

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра общей и технической физики**

**ФИЗИКА**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ**  
**ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНЕТИКОВ**

*Методические указания к лабораторной работе*  
*для студентов всех специальностей*  
*и направлений подготовки бакалавриата*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2020**

УДК 531/534 (073)

**ФИЗИКА. Исследование основных характеристик ферромагнетиков:** Методические указания к лабораторной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *С.С. Прошкин, В.В. Фицак, М.О. Силиванов*. СПб, 2020. 28 с.

Методические указания к лабораторной работе дают возможность ознакомиться с физическими явлениями, методикой выполнения лабораторного исследования и правилами оформления лабораторных работ. Выполнение лабораторной работы позволит студенту сформировать необходимые компетенции.

Предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата.

Научный редактор *А.С. Мустафаев*

Рецензент доц. *Н.И. Егорова* (СПбУ ГПС МЧС РФ)

© Санкт-Петербургский  
горный университет, 2020

## **ФИЗИКА**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНЕТИКОВ**

*Методические указания к лабораторной работе  
для студентов всех специальностей  
и направлений подготовки бакалавриата*

Сост.: *С.С. Прошкин, В.В. Фицак, М.О. Силиванов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *С.С. Прошкин*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 28.05.2020. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,6. Усл.кр.-отт. 1,6. Уч.-изд.л. 1,4. Тираж 150 экз. Заказ 335. С 34.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

**Цель работы:** Исследование основных характеристик ферромагнетиков. Получение кривой намагничивания и зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля. Определение основных характеристик петли гистерезиса.

## *1. Теоретические основы лабораторной работы*

### *1.1. Поле в магнетике*

Опыт показывает, что если проводник с током переместить из вакуума в какую-либо среду, то поле, создаваемое проводником, изменится по сравнению с вакуумом. Это происходит потому что окружающая проводник среда намагничивается, т. е. сама становится источником магнитного поля. Вещества, способные намагничиваться, называются *магнетиками*. Поскольку все вещества намагничиваются, то любое вещество является магнетиком.

В 1822 году Ампер предложил гипотезу, согласно которой в любом веществе существуют микроскопические *молекулярные* токи (*микротоки*). Каждому такому микроток можно сопоставить микроскопический магнитный момент.

Как известно, магнитным моментом рамки с током, площадью  $S$ , называется, вектор, направленный вдоль нормали к плоскости рамки  $\vec{n}$  :

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} . \quad (1)$$

Направление нормали к плоскости рамки определяется направлением движения буравчика при вращении его по току  $I$ .

В классической теории магнитные моменты в атоме появляются в силу кругового движения электронов вокруг ядра, а также из-за магнитных моментов нейтронов и протонов, входящих в состав ядра. В настоящее время установлено, что магнитные моменты протонов и нейтронов почти в 1000 раз меньше магнитных моментов электронов. Поэтому магнитные свойства веществ в основном определяются электронами в составе атомов.

В отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов могут быть ориентированы хаотически или

вовсе отсутствовать. Тогда их суммарное магнитное поле равно нулю, следовательно, вещество не будет намагничено.

Молекулярные токи создают собственное магнитное поле и могут изменять свою ориентацию во внешних магнитных полях. Например, если вблизи намагничивающегося тела поместить проводник с током (*макروتок*), то под действием его магнитного поля микротоки во всех атомах ориентируют магнитные моменты атомов параллельно вектору магнитной индукции, создавая в теле дополнительное магнитное поле (рис. 1). Это происходит из-за того, что на каждый магнитный момент действует вращающий механический момент сил:

$$\overset{i}{M} = [\overset{r}{p}_m, \overset{i}{B}]. \quad (2)$$

В скалярном виде формула (2) запишется так:

$$M = p_m B \sin(\overset{r}{n}, \overset{r}{B}). \quad (3)$$

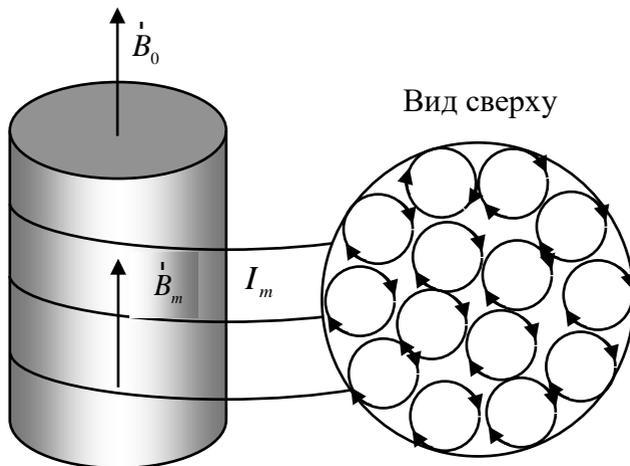


Рис. 1. Молекулярные токи

В результате во внешнем магнитном поле магнитные моменты атомов преимущественно ориентируются вдоль поля и их суммарное магнитное поле будет отлично от нуля. Тогда суммарное

магнитное поле в магнетике представляет собой сумму внешнего поля  $\overset{\cdot}{B}_0$  и поля молекулярных токов атомов вещества  $\overset{\cdot}{B}_m$

$$\overset{\cdot}{B} = \overset{\cdot}{B}_0 + \overset{\cdot}{B}_m. \quad (4)$$

Степень намагничивания вещества определяется вектором **намагниченности**  $\overset{\cdot}{J}$ , который равен отношению суммарного магнитного момента объема вещества к величине этого объема (или **средний** магнитный момент единицы объема вещества):

$$\overset{\cdot}{J} = \frac{\sum \overset{\cdot}{p}_{mi}}{V}, \quad (5)$$

где  $\overset{\cdot}{p}_{mi}$  – магнитный момент  $i$ -ого атома, находящегося в объеме  $V$ .

На рис. 1 изображен намагниченный сердечник катушки с током. Под действием внешнего поля отдельные магнитные моменты атомов  $\overset{\cdot}{p}_{mi}$  ориентируются параллельно внешнему полю. Молекулярные токи соседних атомов в местах их соприкосновения текут в разных направлениях и взаимно компенсируют друг друга. Молекулярные токи, выходящие на наружную боковую поверхность сердечника остаются не скомпенсированными. Они складываются и дают некоторый суммарный ток  $I_m$ . Таким образом, намагниченный сердечник можно представить как цилиндр, по боковой поверхности которого течет ток  $I_m$ . Отметим, что в отличие от тока свободных электронов текущих по обмотке катушки, суммарный молекулярный ток  $I_m$  представляет собой ток **связанных** электронов, каждый из которых принадлежит определенному атому. Ток  $I_m$  называется **током намагничивания**. Обычные токи, текущие по проводникам, определяются перемещением свободных электронов и называются **токами проводимости**  $I$ .

Ток намагничивания  $I_m$  создает собственное магнитное поле  $\overset{\cdot}{B}_m$ , параллельное внешнему полю  $\overset{\cdot}{B}_0$ , поэтому суммарное поле в сердечнике согласно (4) приводит к формуле:

$$B = B_0 + B_m . \quad (6)$$

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородном магнетике отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме, называется магнитной проницаемостью:

$$\mu = \frac{B}{B_0} , \quad (7)$$

где  $B$  - индукция магнитного поля в однородном магнетике;  $B_0$  - индукция магнитного поля в вакууме.

Объединив (4), (6) и (7) получим:

$$B_m = (\mu - 1)B_0 . \quad (8)$$

### 1.2. Парамагнетики и диамагнетики

Магнитные свойства веществ крайне разнообразны, при этом у большинства из них магнитные свойства выражены крайне слабо. Слабомагнитные вещества делятся на две группы – *диамагнетики* и *парамагнетики*.

Диамагнетиками называются вещества, у которых магнитные моменты атомов в отсутствии внешнего поля равны нулю. Это происходит из-за того, что магнитные моменты всех электронов в атоме взаимно скомпенсированы.

При внесении диамагнетика во внешнее магнитное поле, атомы и молекулы приобретают наведенные магнитные моменты, чье поле направлено против внешнего поля, т. е. частично его компенсирует. Поэтому при помещении диамагнетика во внешнее магнитное поле он намагничивается против внешнего поля. В результате у диамагнетиков  $\mu < 1$ .

В 1778 г. С.Дж. Бергман первым заметил, что висмут и сурьма выталкиваются из магнитного поля, что является проявлением диамагнетизма. Сам термин *диамагнетизм* был введен в 1848 г М. Фарадеем, который понял, что все материалы в природе в некоторой степени обладают диамагнитным характером. К диамагнети-

кам относятся: инертные газы, азот, водород, кремний, фосфор, висмут, цинк, медь, золото, серебро, а также многие другие, как органические, так и неорганические соединения.

Диамагнетизм присущ любым молекулам, но в парамагнетиках он оказывается пренебрежимо малым. Парамагнетиками называются вещества, у которых атомы и молекулы имеют собственный магнитный момент даже в отсутствии внешнего поля.

При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле, происходит преимущественная ориентация собственных магнитных моментов атомов по направлению поля, в результате чего парамагнетик намагничивается. Такой процесс называется **ориентационным** намагничиванием, и он напоминает процесс ориентационной поляризации молекул диэлектрика. Таким образом, поле намагниченных молекул парамагнетика усиливает внешнее поле. Поэтому суммарное магнитное поле в парамагнетике больше внешнего поля, и магнитная проницаемость парамагнетика  $\mu > 1$ . Термин парамагнетизм также придумал М. Фарадей в 1848 г. К парамагнетикам относятся: алюминий, платина, многие другие металлы (щелочные и щелочно-земельные металлы, а также сплавы этих металлов), молекулярный кислород, оксид азота, и другие вещества.

Образцы из пара- и диамагнетика, помещенные в неоднородное магнитное поле между полюсами электромагнита, ведут себя по-разному – парамагнетики втягиваются в область сильного поля (рис. 2 (1)), диамагнетики – выталкиваются (рис. 2 (2)).

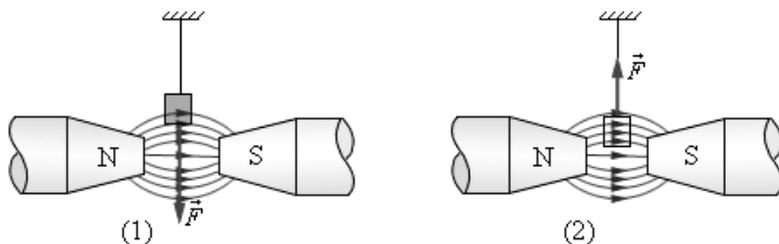


Рис. 2. 1 – парамагнетик во внешнем магнитном поле;  
2 – диамагнетик во внешнем магнитном поле

Ранее отмечалось, что диамагнетики и парамагнетики обладают очень слабыми магнитными свойствами. Это означает, что их магнитная проницаемость очень мало отличается от единицы. Так, например, изменение магнитного поля даже в самых сильных диамагнетиках и парамагнетиках составляет лишь сотые доли процента. Например, висмут (диамагнетик) обладает  $\mu = 0,999826$ ; магнитная проницаемость платины (парамагнетик) равна 1,00036.

Очевидно, вектор намагниченности  $\overset{\uparrow}{J}$  должен зависеть от внешнего магнитного поля  $\overset{\uparrow}{B}$ . Однако,  $\overset{\uparrow}{J}$  принято связывать не с магнитной индукцией, а с вектором магнитной напряженности  $\overset{\uparrow}{H}$ . В этом параграфе ограничимся рассмотрением только тех магнетиков, для которых зависимость между этими векторами имеет линейный характер:

$$\overset{\uparrow}{J} = \chi \overset{\uparrow}{H}, \quad (9)$$

где  $\chi$  - безразмерная величина, называемая *магнитной восприимчивостью*.

Согласно приведенной выше классификации, у диамагнетиков:  $\chi < 0$  и  $\overset{\uparrow}{J} \uparrow \downarrow \overset{\uparrow}{H}$ ; у парамагнетиков:  $\chi > 0$  и  $\overset{\uparrow}{J} \uparrow \uparrow \overset{\uparrow}{H}$ .

Поскольку между магнитной индукцией и напряженностью существует связь в виде формулы:

$$\overset{\uparrow}{B} = \mu \mu_0 \overset{\uparrow}{H}, \quad (10)$$

легко получить следующее соотношение:

$$\mu = 1 + \chi. \quad (11)$$

Свойства диамагнетиков и их магнитная проницаемость не зависят от температуры. В то же время на магнитную проницаемость парамагнетика температура влияет очень сильно, поскольку тепловое движение дезориентирует магнитные моменты молекул, разрушая парамагнитные свойства. Зависимость магнитной восприимчивости парамагнетика от температуры  $T$  носит название *закона Кюри*:

$$\chi_{\text{пм}} = \frac{C}{T},$$

где  $C$  – постоянная Кюри, зависящая от рода вещества.

Рассмотренные в этом параграфе магнетики являются *изотропными*, т. е. намагниченность таких веществ зависит только от величины намагничивающего поля и не зависит от его направления. В таких магнетиках направления векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  в любой точке вещества совпадают.

### 1.3. Ферромагнетики

Вещества, способные сильно намагничиваться во внешнем магнитном поле, называются *ферромагнетиками*. Магнитная проницаемость ферромагнетиков  $\mu$  по порядку величины лежит в пределах ( $10^2 \dots 10^5$ ). К ферромагнетикам кроме основного их представителя – железа (что дало название «ферромагнетизм») – относятся, например, кобальт, никель, гадолиний, а также некоторые сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными элементами (например,  $\text{MnAlCu}$ ,  $\text{CrTe}$  и т. л.). Со второй половины XX века большую роль стали играть ферромагнитные полупроводники, называемые **ферритами**.

У ферромагнетиков зависимости  $J^{\uparrow}(H^{\uparrow})$  или  $B^{\uparrow}(H^{\uparrow})$  имеют весьма сложный нелинейный характер, и для них наблюдается *гистерезис*, т. е. зависимости  $J^{\uparrow}(H^{\uparrow})$  и  $B^{\uparrow}(H^{\uparrow})$  зависят от предыстории магнетика. *Гистерезис* (от греч. *ὕστέρησις* - отставание, запаздывание) – это явление, при котором величина, характеризующая состояние тела (например, намагниченность) неоднозначно зависит от величин, характеризующих внешние условия (например, индукции магнитного поля). Гистерезис наблюдается в тех случаях, когда состояние тела определяется внешними условиями, не только в текущий, но и в предыдущие моменты времени.

В ряде ферромагнитных кристаллов направления векторов напряженности поля и намагниченности могут не совпадать друг с другом. В таких кристаллах величина намагниченности зависит еще

и от направления поля относительно осей кристалла. Подобные вещества называют **анизотропными** магнетиками и для них направления индукции  $\vec{B}$  и напряженности  $\vec{H}$  могут быть различными.

Одной из главных особенностей ферромагнетиков является **спонтанная намагниченность**, т. е. наличие намагниченности при отсутствии внешнего магнитного поля.

На рис. 3 приведена кривая намагничения ферромагнетика, у которого намагниченность при  $H = 0$  равна нулю (нет остаточной намагниченности). Такая кривая называется **основной или нулевой кривой намагничения**. Впервые ее полное экспериментальное исследование было проведено в 1871–1872 гг А.Г. Столетовым. Он также показал, что напряженность поля внутри ферромагнетика сильно зависит от формы образца.

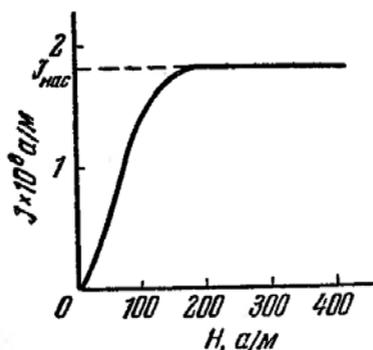


Рис. 3. График зависимости намагничивания от напряженности

Из рис. 3 видно, что уже при сравнительно небольших значениях  $H$  (порядка 100 А/м) намагниченность достигает насыщения  $J_{\text{нас}}$ . Магнитная индукция в ферромагнетике определяется формулой

$$B = \mu_0 (H + J). \quad (12)$$

Поэтому  $B$  также растет с увеличением  $H$ , а после достижения состояния насыщения магнитная индукция продолжает расти по линейному закону (рис. 4):

$$B = \mu_0 (H + J_{\text{нас}}). \quad (14)$$

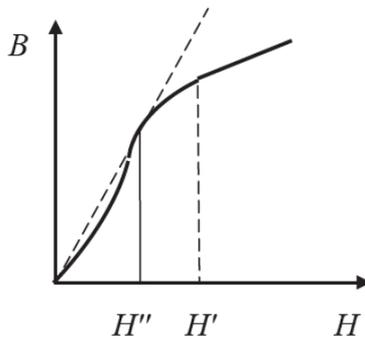


Рис. 4. График зависимости магнитной индукции от напряженности

#### 1.4. Петля гистерезиса. Строение ферромагнетиков

Теоретические и экспериментальные исследования ферромагнетиков в XX веке показали, что их свойства и их внутренняя структура могут быть объяснены только в рамках квантовой механики. Дело в том, что при отсутствии внешнего магнитного поля внутри ферромагнетиков самопроизвольно возникают области намагничивания, в которых магнитные моменты отдельных атомов ориентируются в одном направлении. Объясняется это тем, что у электрона есть собственный механический момент, называемый **спином**. Со спином электрона связан спиновый магнитный момент, который не зависит от орбитального магнитного момента.

Ферромагнетики состоят из атомов, в которых спиновые магнитные моменты электронов не скомпенсированы. Как правило, это кристаллические вещества, для которых характерна анизотропия магнитных свойств. Опыт показывает, что при одних направлениях в кристалле ферромагнетика его намагниченность будет наибольшей, в других – наименьшей. Из рассмотрения магнитных свойств ферромагнетиков следует, что они похожи на сегнетоэлектрики.

При определенных условиях в ферромагнетиках может возникать так называемое **обменное взаимодействие** между атомами, которое заставляет не скомпенсированные спиновые магнитные мо-

менты электронов устанавливаться параллельно друг другу. В результате возникают области (размером  $1 \dots 10$  мкм) спонтанного, т. е. самопроизвольного, намагничивания. Эти области П. Вейс в 1907 г назвал **доменами**.

В каждом домене спиновые магнитные моменты электронов имеют одинаковое направление, вследствие чего каждый домен оказывается намагниченным до насыщения и имеет определенный магнитный момент (рис. 5). Направления этих моментов для разных доменов различны, поэтому при отсутствии внешнего поля суммарный момент образца равен нулю, т. е. образец в целом не намагничен (рис. 5 (1)).

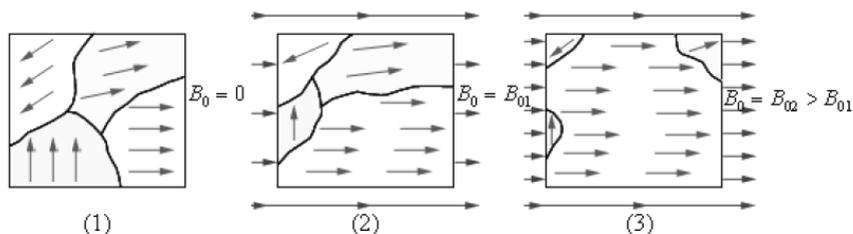


Рис. 5. На рисунке представлен процесс намагничивания ферромагнетика

При включении внешнего магнитного поля домены, ориентированные по полю, растут за счет доменов, ориентированных против поля, а также происходит переориентация магнитных моментов в пределах всего домена (рис. 5 (2)). Этот процесс в слабых полях является обратимым, а в более сильных полях – необратимым. Необратимый процесс перемагничивания приводит к неоднозначной зависимости намагниченности от величины внешнего магнитного поля и служит причиной гистерезиса.

Внешнее магнитное поле ориентирует по полю магнитные моменты не отдельных атомов, как это имеет место в случае парамагнетиков, а целых областей спонтанной намагниченности. Когда все домены ферромагнетика выстроят свои магнитные моменты в одном направлении, дальнейшее намагничивание материала оказывается невозможным, и он достигает состояния магнитного насыщения; при этом границы между отдельными доменами исчезают (рис. 5 (3)). Согласованное участие магнитных моментов всех ато-

мов в создании доменов и междоменное взаимодействие позволяют ферромагнетикам усиливать внешние поля в сотни, тысячи и миллионы раз.

Эксперименты показали, что зависимость  $J$  от  $H$  не является такой плавной, как показано на рисунке 3, а имеет ступенчатый вид. Это явление носит название *эффект Баркгаузена*. Оно обусловлено тем, что переориентация магнитных моментов доменов происходит не плавно, а скачком (рис. 6).

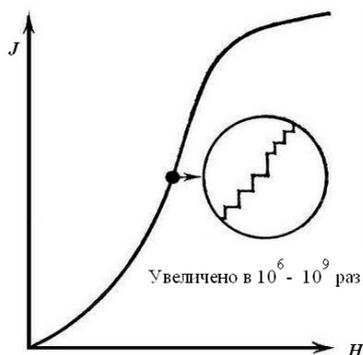


Рис. 6. Иллюстрация эффекта Баркгаузена

Границы доменных зерен можно наблюдать с помощью обычного микроскопа. Для этого отшлифованный срез ферромагнетика достаточно покрыть слоем жидкости с мелкодисперсным ферритовым порошком. Поскольку на границе доменов магнитное поле резко неоднородно, то частицы порошка переместятся в жидкости так, что расположатся вблизи границ доменов (рис. 7).

Возникающая на определенном этапе необратимость намагничивания материала позволяет ферромагнетикам частично сохранять намагниченность после удаления их из поля. При уменьшении напряженности внешнего поля можно наблюдать процесс запаздывания уменьшения магнитной индукции.

Если довести намагничение ферромагнетика до насыщения (точка 1, рис. 8) и затем уменьшать напряженность магнитного поля, то намагничение следует не первоначальной кривой 0-1, а изменяет-

ся в соответствии с кривой 1-2. В результате, когда напряженность внешнего поля станет равной нулю (точка 2), намагниченность не исчезает и характеризуется величиной  $B_r$ , которая называется *остаточной индукцией*.

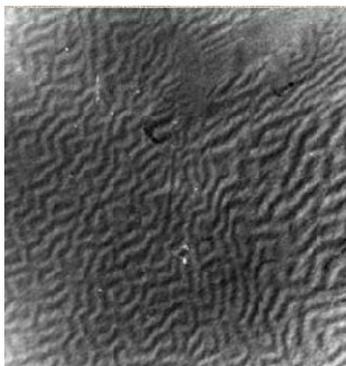


Рис. 7. Фотография доменной структуры ферромагнетика под микроскопом

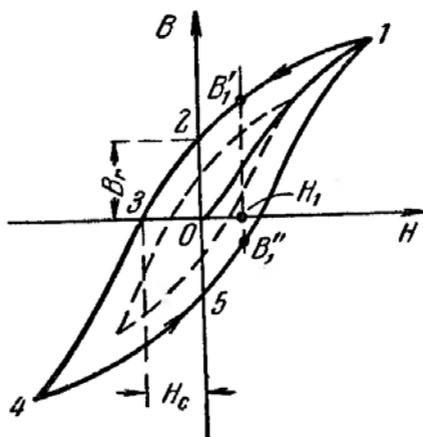


Рис. 8. Петля гистерезиса

Намагниченность при этом имеет значение  $J_r$ , называемое *остаточным намагничением*. Намагниченность обращается в нуль (точка 3) лишь под действием поля  $H_c$ , имеющего направление, проти-

воположное полю, вызывающему намагничение. Напряженность  $H_c$  называется **коэрцитивной силой** (от лат. *coercitio* - удерживать).

При действии на ферромагнетик переменного магнитного поля индукция изменяется в соответствии с кривой 1-2-3-4-5-1 (рис. 8), которая называется **петлей гистерезиса**. Если максимальные значения  $H$  таковы, что намагничение достигает насыщения получается максимальная петля гистерезиса (сплошная петля на рис. 8). Если при амплитудных значениях  $H$  насыщение не достигается, получается петля, называемая **частным циклом** (пунктирная петля на рис. 8). Частных циклов может существовать бесконечное множество, все они расположены внутри максимальной петли гистерезиса.

Гистерезис приводит к тому, что намагничение ферромагнетика в сильной мере зависит от того, в каких полях он был ранее намагничен. Например, в поле напряженности  $H_1$  (рис. 8) индукция может иметь любое значение в пределах от  $B_1'$  до  $B_1''$ .

Можно показать, что площадь петли гистерезиса пропорциональна количеству теплоты, выделяющемуся в единице объема ферромагнетика за один цикл перемагничивания. Выделение теплоты происходит из-за того, что часть работы, затраченной на развороты доменов, неизбежно переходит в тепло.

Различные типы ферромагнетиков характеризуются разными по виду гистерезисными кривыми. Ферромагнетики с малой (в пределах от нескольких тысячных до 800 А/м) коэрцитивной силой (с узкой петлей гистерезиса) называются **магнитомягкими**, а с большой коэрцитивной силой более 4 кА/м (с широкой петлей гистерезиса) – **магнитожесткими**. К мягким ферромагнетикам относится железо и сплавы на его основе (так называемое трансформаторное железо), применяемые в качестве сердечников различных трансформаторных устройств (рис. 9а). Одним из материалов, относящихся к жестким ферромагнетикам, является сплав Алнико-5 (10% Al, 19% Ni, 18% Co, 53% Fe). Петля гистерезиса для этого сплава имеет ширину, превышающую ширину петли для трансформаторного железа (рис. 9б).

Магнитомягкие ферромагнетики применяются для изготовления постоянных магнитов, а магнитожесткие – для изготовления сердечников трансформаторов.

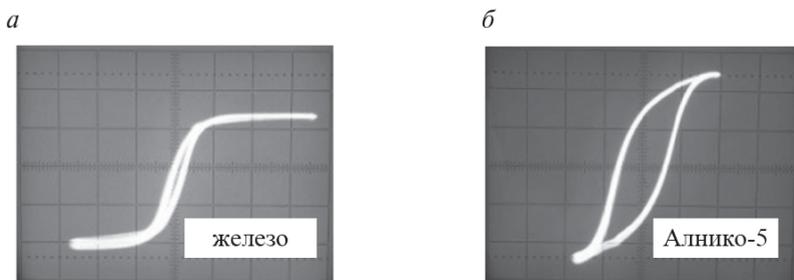


Рис. 9. Петли гистерезиса: а) магнитомягкого ферромагнетика; б) магнитожесткого ферромагнетика

Магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетиков не является постоянной величиной, а сильно зависит от индукции внешнего поля. Поэтому понятие магнитной проницаемости применяется только к основной кривой намагничивания.

Поскольку зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля нелинейная, зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  от напряженности поля тоже нелинейная:

$$B = \mu(H)\mu_0 H ,$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Рассмотрим основную кривую намагничивания (рис. 10, а). Проведем из начала координат прямую линию, проходящую через произвольную точку кривой. Тангенс угла наклона этой прямой пропорционален отношению  $B/H$ , т. е. относительной магнитной проницаемости  $\mu$  для соответствующего значения напряженности поля.

При увеличении  $H$  от нуля угол наклона (а значит и  $\mu$ ) сначала возрастает. В точке 2 он достигает максимума (прямая 0-2 является касательной к кривой), а затем убывает. На рис. 10, б дан

график зависимости  $\mu$  от  $H$ . Из рисунка видно, максимальное значение проницаемости достигается несколько раньше, чем насыщение. При дальнейшем увеличении намагничивающего поля магнитная проницаемость уменьшается, асимптотически приближаясь к значению  $\mu = 1$ , когда ферромагнетик практически не влияет на магнитное поле в занимаемом им объеме. Само понятие «магнитная проницаемость» для ферромагнетика применимо только к «кривой начального намагничивания» - основной кривой намагничивания ферромагнетика. В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости ферромагнетика.

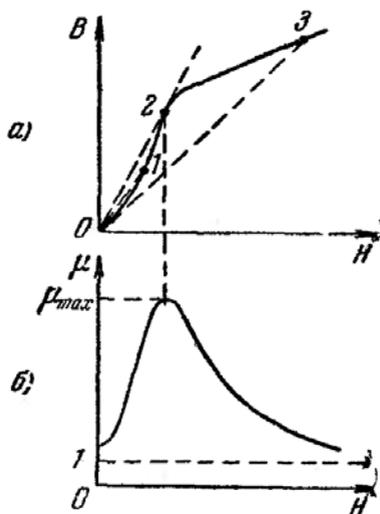


Рис. 10. Кривая первоначального намагничивания (а);  
зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего поля (б)

Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура, называемая *температурой* или *точкой Кюри*, при которой он теряет свои ферромагнитные свойства. При нагревании образца выше точки Кюри ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик в результате фазового перехода II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества. В результате фазового перехода доменная структура ферромагнетика

разрушается из-за интенсивного теплового движения атомов. Переход вещества из ферромагнитного состояния в парамагнитное состояние, происходящий в точке Кюри, не сопровождается поглощением или выделением теплоты и подчиняется закону Кюри-Вейса:

$$\chi = \frac{C'}{T - T_C}, \quad (15)$$

где  $C'$  – постоянная Кюри;  $T_C$  – температура Кюри.

Температуры Кюри для некоторых веществ имеют следующие значения: кобальт – 1150 °С, железо – 770 °С, пермаллой (сплав 22 % Fe, 78 % Ni) – 550 °С, никель – 360 °С, гадолиний – 17 °С.

### *1.5. Применение ферромагнетиков*

Ферромагнитные материалы играют огромную роль в самых различных областях современной техники. Магнитомягкие материалы используются в электротехнике при изготовлении трансформаторов, электромоторов, генераторов, в слаботочной технике связи и радиотехнике; магнито жесткие материалы применяются при изготовлении постоянных магнитов.

Широкое распространение в радиотехнике, особенно в высокочастотной радиотехнике, получили **ферриты** ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) сочетающие ферромагнитные и полупроводниковые свойства.

Магнитные материалы широко используются в традиционной технологии записи информации на жестком диске (рис. 11). Магнитное вещество нанесено тонким слоем на основу твердого диска. Каждый бит информации представлен группой магнитных доменов (в идеальном случае – одним доменом). Для перемагничивания домена (изменения направления вектора его намагниченности) используется магнитное поле записывающей (считывающей) головки. Запись на вертикально ориентированные домены современных жестких дисков превышает плотность 1,5 Тбит/см<sup>2</sup>.

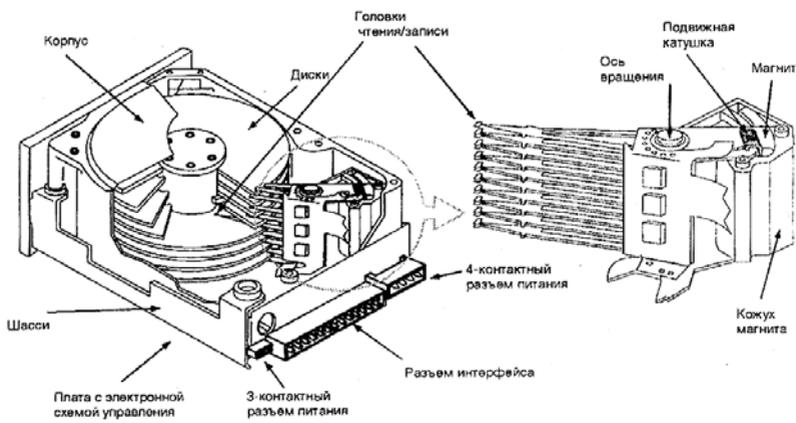


Рис. 11. Внешний вид магнитного винчестера

Использование постоянных магнитов из ферромагнетиков нашло широкое применение в промышленности. В обогащительном деле при их помощи производят сепарацию, т. е. отделяют полезные ископаемые от пустой породы

Без постоянных магнитов не смогли бы работать электромашинные генераторы и электродвигатели. Термоядерный синтез, магнитодинамическое генерирование электроэнергии, ускорение заряженных частиц в синхротронах и др. – все это области, где требуются магниты. Природные магниты, как правило, не достаточно эффективны в решении некоторых производственных проблем и используются в основном только в бытовой технике и в измерительной аппаратуре.

Процесс намагничивания ферромагнетиков сопровождается изменением их линейных размеров и объема, т. е. деформацией. Возникающие при этом деформации весьма малы: относительное изменение линейных размеров образца ферромагнетика в полях порядка  $10^5$  А/м обычно составляет  $10^{-5} \dots 10^{-6}$ . Это явление было открыто в середине XIX века Джоулем и получило название **магнито-стрикции**. Магнитострикцию используют подобно обратному пьезоэлектрическому эффекту для устройства мощных излучателей ультразвуковых волн.

## 2. Методика проведения эксперимента

На рис. 12 изображена электрическая схема лабораторной установки. Электрическая схема включает в себя: источник переменного напряжения (генератор) и сопротивление  $R_1$  в цепи намагничивающей катушки  $L_1$ ; вторичную измерительную катушку  $L_2$ ; (катушки  $L_1$  и  $L_2$  намотаны на общий ферромагнитный сердечник); сопротивление  $R_2$  и конденсатор  $C$  в цепи катушки  $L_2$ .

Для получения петли гистерезиса на экране осциллографа необходимо подать на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки (вход X осциллографа) напряжение  $U_x$ , пропорциональное напряженности  $H$  намагничивающего поля, а на вертикально отклоняющие пластины – напряжение  $U_y$ , пропорциональное магнитной индукции  $B$  в исследуемом образце. Тогда за один период изменения синусоидального тока в катушке  $L_1$  электронный луч на экране опишет полную гистерезисную петлю и в каждый последующий период времени повторит ее.

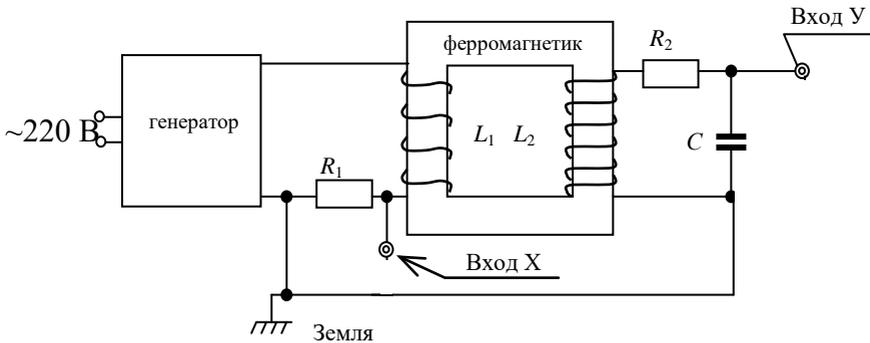


Рис. 12. Электрическая схема лабораторной установки

При изменении силы переменного тока через катушку  $L_1$  будет изменяться и гистерезисная петля, причем вершины всех петель будут лежать на основной кривой намагничивания (рис. 13). Напряжение  $U_x$  снимается с сопротивления  $R_1$ , соединенного последовательно с намагничивающей катушкой  $L_1$ . Ток в намагничивающей цепи

$I_1 = \frac{U_x}{R_1}$ , а напряженность намагничивающего поля  $H = \frac{N_1 I_1}{l_1}$ , где  $N_1$

и  $l_1$  соответственно число витков и длина катушки  $L_1$ .

Таким образом,

$$H = \frac{N_1 U_x}{l_1 R_1}, \quad (16)$$

следовательно, напряженность намагничивающего поля пропорциональна падению напряжения на сопротивлении  $R_1$ .

Напряжение  $U_y$ , снимаемое с конденсатора  $C$  в цепи катушки  $L_2$  (Вход Y), пропорционально индукции  $B$  в образце согласно формуле:

$$U_y = -\frac{N_2 S}{R_2 C} \int_0^B dB = -\frac{N_2 S B}{R_2 C}. \quad (17)$$

Напряжения  $U_x$  и  $U_y$ , соответствующие вершине петли гистерезиса, определяются следующим образом (рис. 14). Необходимо замерить на экране осциллографа координаты вершины петли гистерезиса  $x_{\text{макс}}$  и  $y_{\text{макс}}$ , тогда  $U_x = h \cdot x_{\text{макс}}$  и  $U_y = b \cdot y_{\text{макс}}$ ,  $h$  и  $b$  цена деления по осям OX и OY соответственно.

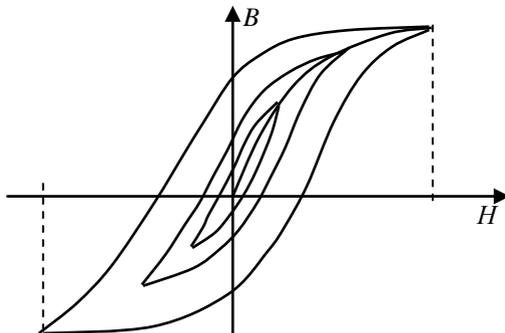


Рис. 13. Петли гистерезиса для ферромагнетика

Таким образом, напряженность магнитного поля равна:

$$H_{\text{макс}} = \frac{N_1 h}{l_1 R_1} x. \quad (18)$$

Аналогично определяется магнитная индукция  $B_{\text{макс}}$ :

$$B_{\text{макс}} = \frac{R_2 C b}{N_2 S} y. \quad (19)$$

### Параметры элементов электрической схемы (рис. 12):

$N_1 = 50$	$N_2 = 1200$	$R_1 = 84 \text{ Ом}$
$R_2 = 390 \text{ кОм}$	$l_1 = 10 \text{ мм}$	$C = 0,25 \text{ мкФ}$
$S = (15 \times 20) \text{ мм}^2$	$h = 5 \text{ В/дел}$	

$$\Delta R_1 / R_1 = \Delta R_2 / R_2 = \Delta C / C = 0,1$$

### 3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с электрической схемой установки (рис. 12).
2. Включить осциллограф, отрегулировать яркость (INTEN) и фокусировку (FOCUS) светового пятна регуляторами, расположенными справа от экрана осциллографа.
3. Ручкой смещения (POSITION  $\blacktriangleleft$ ) по осям OX (на рис. 14 ручка 1) и (POSITION  $\blacktriangleup$ ) OY (на рис. 14 ручки 2 и 3) выставить пятно в центр экрана. Переключатель 4 установить в положение 1 В/дел (это значение соответствует коэффициенту  $b$  в соответствующих формулах расчета), переключатель 5 установить в положение 5 В/дел (соответствует коэффициенту  $h$ ), ручку плавной регулировки, находящейся на переключателе 4, повернуть по часовой стрелке до упора.
4. Включить генератор ГЗ-109 в сеть. Регулятором частоты на генераторе (расположенном в центре лимба с круговой шкалой, обозначенной “Hz”) и множителем частоты (расположенном слева от лимба регулятора частоты) установить частоту 50 Гц. Регулято-

ром амплитуды выходного сигнала на генераторе (на рис. 15 ручка 7) подать сигнал в электрическую схему и получить на экране осциллографа петлю гистерезиса (рис. 14). Добиться получения максимально возможной, но не выходящей за пределы экрана, гистерезисной кривой (при этом координата вершины петли равна  $x_{\max} = 5$  делений). Все кнопки должны быть отжаты, кроме кнопки 6, она должна быть в положении INV. Убедиться, что, петля гистерезиса расположена симметрично относительно начала координат, при необходимости с помощью ручек 1 – 3 провести дополнительную центровку.

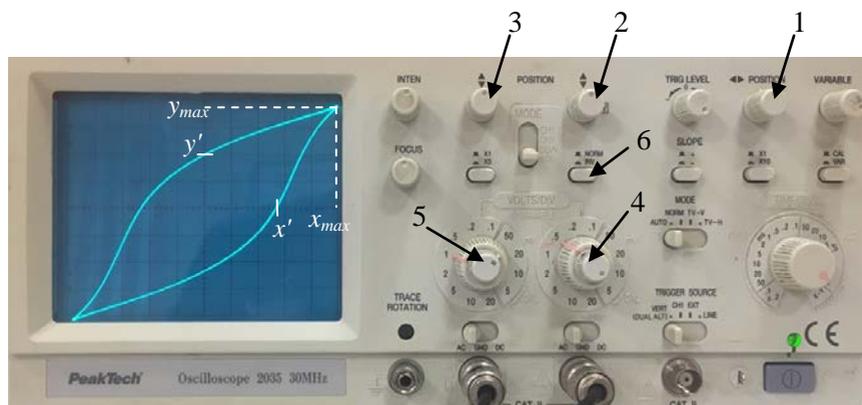


Рис. 14. Максимальная петля гистерезиса на экране осциллографа



Рис. 15. Генератор сигналов ГЗ-109 (источник переменного напряжения)

### Задание 1. Измерение основной кривой намагничения

Произвести отсчет координат точек  $x_{\max}$  и  $y_{\max}$  петли гистерезиса (измерения производятся путем измерения полного размаха кривой и деления его значения пополам, т. е.  $x_{\max} = x/2$ , где  $x$  – количество делений от  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$ , аналогично для  $y_{\max}$ ) и записать их в табл. 1. Для этой кривой снять также координаты точек  $x'$  и  $y'$ , соответствующих  $H_k$  ( $y = 0, x'$ ), и  $B_{\text{ост}}$  ( $x = 0, y'$ ). Измерения производить, уменьшая напряжение на выходе генератора (рис. 15), поворачивая против часовой стрелки ручку регулятора выхода (ручка 7) так, чтобы координата  $x$  менялась через половину большого деления ( $\approx 5$  мм). В процессе измерения необходимо изменять масштаб по оси  $y$  (ручка 4, коэффициент  $b$ ) и по оси  $x$  (ручка 5, коэффициент  $h$ ) так, чтобы кривая гистерезиса была максимально большой, но не выходила за экран осциллографа. При снятии показаний необходимо записывать соответствующие коэффициенты  $b$  и  $h$ , при которых производились измерения.

Таблица 1.

$x_{\max}$ , дел	$h$ , В/дел	$H_{\max}$ , А/м	$y_{\max}$ , дел	$b$ , В/дел	$B_{\max}$ , Тл	$x'$ , дел	$H_k$ , А/м	$y'$ , дел	$B_{\text{ост}}$ , Тл	$\mu$
5	5			1						
4,5	5			1						
4,0	5			1						
3,5	5			1						
3,0	5			0,5						
2,5	5			...						
2	5									
1,5	5									
1,0	5									
0,5	5									

\*Записать погрешности всех прямых измерений.

### Задание 2. Измерение максимальной петли гистерезиса

Восстановить на экране максимальную петлю гистерезиса (рис. 14). Расположить ее симметрично относительно центра экрана осциллографа.

Разбить ось  $X$  в пределах максимальной петли на 10 примерно одинаковых интервалов и записать в таблицу 2 в больших делениях шкалы координаты  $x$  границ этих интервалов. При этом значение  $x = 0$  должно соответствовать центру петли на экране, 5 значений слева (в отрицательной части оси  $X$ ) и 5 значений справа (в положительной части оси). Измерить соответствующие координаты  $y$  для частей петли, расположенных ниже ( $y_n$ ) и выше ( $y_v$ ) оси  $x$  с точностью до десятых долей делений шкалы. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2.

$x$ , дел	$h$ , В/дел	$H$ , А/м	$y_n$ , дел	$y_v$ , дел	$b$ , В/дел	$B_n$ , Тл	$B_v$ , Тл
-5	5						
-4	5						
-3	5						
-2	5						
-1	5						
0	5						
1	5						
2	5						
3	5						
4	5						
5	5						

\*Записать погрешности всех прямых измерений.

6. Выключить генератор и осциллограф.

#### 4. Обработка результатов измерений

**Задание 1.** Рассчитать напряжения, записанные в табл. 1, согласно формул:  $U_x = h \cdot x_{\text{макс}}$  и  $U_y = b \cdot y_{\text{макс}}$ . По формулам (18) и (19) найти максимальную напряженность и индукцию магнитного поля в ферромагнетике, а также значения коэрцитивной силы и остаточной индукции. Значения величин, входящих в эти соотношения, берутся из табл. 1 (при этом  $x$  и  $y$  имеют размерность в делениях, т. к. масштабные коэффициенты  $h$  и  $b$  заданы в В/дел). Вычисленные значения  $H_{\text{макс}}$  и  $B_{\text{макс}}$  следует занести в табл. 1.

На миллиметровой бумаге построить график основной кривой намагничивания по данным табл. 1.

Согласно методики, изображенной на рис. 10, рассчитать магнитную проницаемость ферромагнетика. Полученные значения  $\mu$  занести в табл. 1.

Построить на миллиметровой бумаге график зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля:  $\mu = f(H)$ .

По приведенным ниже формулам рассчитать погрешности измеренных косвенным путем величин  $H_{\text{макс}}$  и  $B_{\text{макс}}$ :

$$\Delta_{H_{\text{макс}}} = H \sqrt{\left(\frac{\Delta_{l_1}}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_1}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{x_m}}{x_m}\right)^2};$$

$$\Delta_{B_{\text{макс}}} = B \sqrt{\left(\frac{\Delta_C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_2}}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{y_m}}{y_m}\right)^2}.$$

**Задание 2.** Рассчитать напряжения  $U_x$  и  $U_y$ , записанные в табл. 2. Вычислить значения  $B$  и  $H$  для каждой точки петли гистерезиса по формулам (18) и (19). Записать эти значения в табл. 2.

По данным таблицы построить на миллиметровой бумаге максимальную петлю гистерезиса  $B = f(H)$ .

Определить потери энергии в ферромагнетике, затрачиваемые на его перемагничивание. Как показывает опыт, эта энергия идет на увеличение внутренней энергии ферромагнетика, т. е. на его нагрев. При перемагничивании ферромагнетика с частотой переменного тока  $\nu = 50$  Гц количество теплоты, выделяющееся в образце ферромагнетика объемом  $V$  за 1 секунду, будет равно:

$$W = \nu V S_{\text{гист}}, \quad (20)$$

где  $V = 0,016 \text{ м}^3$  – объем ферромагнетика.

Для нахождения энергии, затрачиваемой на нагрев ферромагнетика, следует вычислить площадь, охватываемую максимальной петлей гистерезиса в  $\text{мм}^2$ , и полученный результат умножить на произведение масштабных множителей по осям  $x$  и  $y$  графика петли гистерезиса, т. е. Тл/мм и А/мм.

### Контрольные вопросы

1. Что такое намагниченность? Какая величина может служить ее аналогом в теории диэлектриков?
2. Какие вещества называются диамагнетиками и парамагнетиками?
3. Как свойства диамагнетиков и парамагнетиков зависят от температуры?
4. Какие вещества называют ферромагнетиками? Что такое доменная структура ферромагнетика.
5. Что такое гистерезис? Как объяснить наличие гистерезиса в ферромагнетиках?
6. Что такое коэрцитивная сила? Что такое остаточная индукция?
7. Что такое основная кривая намагничивания?
8. Как свойства ферромагнетика зависят от температуры?
9. Как наблюдать гистерезисную петлю на экране осциллографа?
10. Как выглядят графики, зависимостей магнитной проницаемости и магнитной индукции в ферромагнетике от напряжения внешнего магнитного поля?

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Калашиников Н.П.* Основы физики. М.: Дрофа, 2004. Т. 1
2. *Савельев И.В.* Курс физики. М.: Наука, 1998. Т. 2.
3. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. М.: Высшая школа, 2000.
4. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. М.: Бинوم, 2006.
5. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1998.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Теоретические основы лабораторной работы.....	3
1.1. Поле в магнетике.....	3
1.2. Парамагнетики и диамагнетики .....	6
1.3. Ферромагнетики.....	9
1.4. Петля гистерезиса. Строение ферромагнетиков.....	11
1.5. Применение ферромагнетиков.....	18
2. Методика проведения эксперимента .....	20
3. Порядок выполнения лабораторной работы .....	22
4. Обработка результатов измерений.....	25
Контрольные вопросы.....	27
Библиографический список.....	27