



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Рубцовский индустриальный институт (филиал)**  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
(РИИ АлтГТУ)

**В.И. БАХМАТ**  
**В.В. БОРИСОВСКИЙ**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

**Методические указания к лабораторным работам по физике  
для студентов технических направлений  
всех форм обучения**

Рубцовск 2015

УДК 537.87

Бахмат В.И., Борисовский В.В. Электричество и магнетизм: Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов технических направлений всех форм обучения/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2015. – 27 с.

Методические указания включают цикл лабораторных работ по разделу курса общей физики "Электричество и магнетизм".

Все работы составлены по единому плану: дается теоретическое введение, описание установки, указываются порядок выполнения работы и последовательность обработки результатов наблюдений и вычислений, меры безопасности при проведении лабораторных работ.

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры высшей математики, физики и химии Рубцовского индустриального института.

Протокол № 4 от 10.12.2015 г.

Рецензент: к.т.н., доцент

С.А. Гончаров

© Рубцовский индустриальный институт, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ.....	4
1.1. Общие положения.....	4
1.2. Характеристика выполняемой работы и рабочего места.....	4
1.3. Обязанности студентов при выполнении лабораторных работ.....	4
1.4. Поведение при возникновении несчастных случаев и пожара.....	5
2. ОЦЕНКА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕС- КИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	5
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	6
3.1. Исследование электрического поля.....	6
3.2. Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона.....	8
3.3. Изучение работы электронной лампы.....	10
3.4. Определение горизонтальной составляющей напряженности маг- нитного поля Земли.....	12
3.5. Определение удельного заряда электрона.....	15
3.6. Определение индуктивности катушки.....	20
3.7. Снятие петли гистерезиса для стали.....	22
3.8. Определение скорости распространения волны в проволоке.....	25

# **1. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ**

## **1.1. Общие положения**

**1.1.1.** К работе в учебной лаборатории допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности. Инструктаж проводит преподаватель на вводном занятии, после чего студенты расписываются в специальном журнале, который хранится в лаборатории.

**1.1.2.** Студенты, допущенные к занятиям, должны знать правила работы на установках, изложенные в руководстве к лабораторным работам по курсу общей физики, инструкцию № 247 по мерам оказания первой медицинской помощи.

**1.1.3.** Выполнять работы разрешается только на исправных и полностью укомплектованных лабораторных установках. На рабочем месте не должны находиться предметы, не требующиеся при выполнении задания.

**1.1.4.** Находясь в учебной лаборатории, студенты должны быть внимательными, дисциплинированными, точно выполнять указания преподавателя.

**1.1.5.** Студенты, виновные в нарушении инструкции, несут ответственность, степень которой зависит от характера нарушения и последствий.

## **1.2. Характеристика выполняемой работы и рабочего места**

**1.2.1.** Лабораторные установки по курсу общей физики включают в себя мерительные инструменты, электроизмерительные и осветительные приборы, а также вычислительную технику.

**1.2.2.** Перед началом работы в учебной лаборатории студент обязан: привести в порядок рабочее место, убрать всё, что может помешать при работе; внимательно провести внешний осмотр установок, убедиться в исправном состоянии измерительных приборов, клемм, соединительных проводов и кнопок управления, выключателя сети. Осмотр производить при отключенных установках.

**1.2.3.** Работа на установках запрещается при обнаружении повреждения изоляции электропроводки, неисправностей отдельных узлов, при отсутствии заземления и предохранительных приспособлений.

## **1.3. Обязанности студентов при выполнении лабораторных работ**

**1.3.1.** Работать разрешается только на установках, за которыми студент закреплен и которые им хорошо изучены.

**1.3.2.** Следить за освещенностью рабочего места.

**1.3.3.** Электрическую схему следует собирать так, чтобы провода не перекрещивались, не натягивались и не скручивались петлями. Приборы управления и измерительные приборы расставлять так, чтобы было удобно производить переключения, передвигать ползунки и рукоятки, наблюдать за приборами, не перегибаясь через приборы и провода.

**1.3.4.** После сборки схемы установки начинать работу можно только после разрешения преподавателя.

**1.3.5.** Перед включением установки в сеть Латр должен быть выведен в нулевое положение, а положение ползунка реостата соответствовать максимальному сопротивлению цепи; ключи, подающие напряжение в измерительную цепь, разомкнуты.

**1.3.6.** Изменять напряжение в цепях необходимо плавно. При проведении переключений отключить всю установку от сети.

**1.3.7.** При обнаружении повреждений электрического оборудования, измерительных приборов и проводов необходимо немедленно отключить лабораторную установку и сообщить об этом преподавателю.

**1.3.8.** После окончания работы отключить установки от электросети, убрать рабочее место, о всех неполадках сообщить преподавателю.

#### **1.4. Поведение при возникновении несчастных случаев и пожара**

**1.4.1.** При возникновении пожара необходимо пользоваться огнетушителем и песком, имеющимися в лаборатории.

**1.4.2.** При возникновении несчастного случая следует действовать согласно инструкции № 247 от 8 сентября 1981 года по мере оказания первой медицинской помощи в лабораториях.

## **2. ОЦЕНКА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Абсолютная систематическая погрешность измерений, производимых электроизмерительными приборами, оценивается исходя из класса точности приборов. Обозначение класса точности 0,2; 0,5; 1,0 и т.д. не только характеризует прибор в зависимости от системы, конструкции и других факторов, но и указывает, что относительная систематическая погрешность показаний прибора соответствующего класса в любом месте шкалы не должна превышать 0,2%; 0,5%; 1%.

Если обозначить через  $A$  максимально возможное показание прибора, через  $n$  – номер класса прибора, то получим абсолютную систематическую погрешность прибора  $\delta A = nA$ .

Например, вольтметр 0,2 класса ( $n = 0,002$ ), шкала которого рассчитана на 50 В, имеет абсолютную систематическую погрешность, равную

$$\delta U = \pm 0,002 \cdot 50 \text{ В} = \pm 0,1 \text{ В},$$

а амперметр класса 1,5, рассчитанный на максимальное показание 5 А, имеет абсолютную систематическую погрешность

$$\delta I = \pm 0,015 \cdot 5 \text{ А} = \pm 0,075 \text{ А}.$$

Так как абсолютная систематическая погрешность считается одинаковой по всей шкале данного электроизмерительного прибора, то относительная систематическая погрешность будет тем больше, чем меньше измеряемая величина. Если, например, при помощи указанного амперметра измерить ток

около 4 А, то относительная систематическая погрешность составит 1,9 %, а при измерении силы тока около 1 А – 7,5 %.

При точных измерениях следует пользоваться такими приборами, чтобы предполагаемое значение измеряемой величины составляло 70 – 80 % от максимального (номинального) значения. Поэтому применяют приборы, имеющие несколько пределов измерений. При работе с такими приборами их включают в цепь на тот предел измерений, который достаточно близок к предполагаемому значению измеряемой величины.

### 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

#### 3.1. Исследование электрического поля

**Приборы и принадлежности:** установка для изучения электрического поля, набор электродов, осциллограф.

**Цель работы:** а) опытным путем найти эквипотенциальные линии; б) построить качественную картину электрического поля.

**Теория метода и описание установки.** Для характеристики электрического поля применяют две основные величины: вектор напряженности поля  $\vec{E}$ , являющийся его силовой характеристикой, и потенциал  $\varphi$ , являющийся его энергетической характеристикой. Графически эти величины иллюстрируются силовыми линиями напряженности и эквипотенциальными поверхностями. Силовой линией электрического поля называется линия, касательные в каждой точке которой определяют направления векторов напряженностей соответствующих точек электрического поля. Число силовых линий, проходящих через единицу площади, нормальной к этим линиям, определяет величину вектора напряженности электрического поля в центре этой площади.



Рис.3.1.1

Эквипотенциальная поверхность (поверхность равного потенциала) представляет собой геометрическое место точек с одинаковым потенциалом. Вектор напряженности данной точки электрического поля перпендикулярен к эквипотенциальной поверхности, проведенной через эту точку. На рис. 3.1.1 графически изображено электрическое поле, образованное положительным зарядом  $q$  и отрицательно заряженной плоскостью  $P$ . Сплошные линии – эквипотенциальные поверхности, штриховые – силовые линии поля. Направление силовых линий показано стрелкой.

Направление силовых линий показано стрелкой.

Работа заключается в построении качественной картины электрического поля при помощи силовых линий и кривых равного потенциала. Так как силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям, то достаточно найти положение этих поверхностей, а затем можно построить и силовые линии.

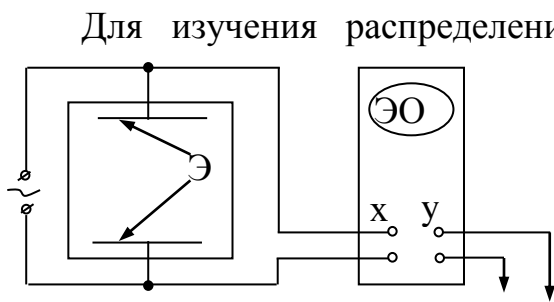


Рис. 3.1.2

Для изучения распределения потенциалов в электрическом поле на пластину из плексигласа или в ванночку помещают влажный лист бумаги. На бумагу устанавливают плоские электроды различных форм, между которыми поддерживается постоянная разность потенциалов (рис. 3.1.2). Бумага имеет незначительную проводимость по сравнению с металлом, а потому

металлические электроды можно считать поверхностями равного потенциала. Для изучения распределения потенциалов в поле берут два острых металлических щупа, соединенных с осциллографом. К электродам подводится переменное напряжение (переменное напряжение используется для исключения электролиза). Один из щупов устанавливают неподвижно на расстоянии 1–1,5 см от электрода, с помощью другого щупа (подвижного) отыскивают на бумаге точки, для которых на экране осциллографа будет прямая линия.

Соединяя эти точки, получают эквипотенциальную линию. Аналогично находят эквипотенциальные линии во всем промежутке между электродами.

### Порядок выполнения работы

1. Приготовить три листа бумаги в клеточку.
2. Собрать схему (рис. 3.1.2) с двумя плоскими электродами и показать ее преподавателю.
3. Подготовить осциллограф к работе. Увлажнить один лист бумаги и поместить его на пластинку или в ванночку. По краям листа установить два плоских электрода.
4. На электроды подать переменное напряжение и с помощью щупов найти точки равного потенциала. Для этого один щуп установить неподвижно на расстоянии 1 – 1,5 см от электрода, а второй перемещать по поверхности бумаги до тех пор, пока на экране осциллографа пикообразный сигнал не сольется в линию. Таким образом найти 8 – 10 точек и, соединяя их, получить эквипотенциальную линию.
5. Первый (неподвижный) щуп установить на расстоянии 1 – 1,5 см от полученной эквипотенциальной линии и повторить все операции п. 4. Передвигая первый щуп, построить все эквипотенциальные линии.
6. Провести систему ортогональных (силовых) линий.
7. Операции пунктов 4 – 6 повторить для двух других пар электродов: а) плоскость и точка; б) кольцо и точка внутри кольца.
8. Сделать вывод по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какие поля называются электростатическими?
2. Что такое напряженность  $\vec{E}$  электростатического поля?
3. Каково направление вектора напряженности  $\vec{E}$ ? Единица напряженности в СИ?

4. Дайте определения потенциала данной точки электрического поля и разности потенциалов двух точек поля. Каковы их единицы?

5. Какова связь между напряженностью и потенциалом?

### Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 2. Электродинамика [текст] : Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 81 с.
2. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=34](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34)
3. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб. : Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=38](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38)
4. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т.: Т. 3.[текст]/ И.В. Савельев. - М.: Кнорус, 2009. - 359 с.

### 3.2. Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона

**Приборы и принадлежности:** реохорд, набор сопротивлений, магазин сопротивлений, гальванометр, источник тока.

**Теория метода и описание установки.** Мост Уитстона предназначен для

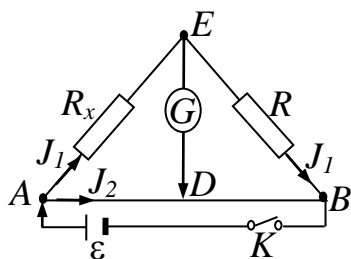


Рис. 3.2.1

измерения сопротивлений. Он состоит из реохорда АВ, чувствительного гальванометра  $G$  и двух сопротивлений – известного  $R$  и неизвестного  $R_x$  (рис. 3.2.1). Реохорд представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт  $D$ . При равновесии моста потенциал в точке  $E$  равен потенциалу в точке  $D$ . Тогда на основании

второго закона Кирхгофа для контуров  $AED$  и  $EBD$  можно записать

$$\begin{aligned} J_1 R_x - J_2 r_{AD} &= 0, \\ J_1 R - J_2 r_{DB} &= 0. \end{aligned}$$

Откуда получаем условие равновесия моста  $\frac{R_x}{R} = \frac{r_{AD}}{r_{DB}}$ .

Так как сопротивления участков  $AD$  и  $DB$  пропорциональны их длинам  $\ell_1$  и  $\ell_2$ , то

$$R_x = R \frac{\ell_1}{\ell_2} = R \frac{\ell}{\ell - \ell_1}, \quad (3.2.1)$$

где  $\ell$  - длина всего реохорда.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 4 и показать ее преподавателю.
2. Установить движок на середине реохорда, включить установку с измеряемым сопротивлением  $R_x$  и подобрать сопротивление  $R$  в магазине так, чтобы ток в гальванометре почти исчез. Окончательно установить стрелку



гальванометра на нулевое положение путем небольших передвижений контакта D и произвести отсчет длин плеч реохорда  $\ell_1$  и  $\ell_2$ .

3. Сместить контакт D из положения равновесия и вновь установить стрелку гальванометра на нулевое положение. Отсчитать по линейке  $\ell_1$  и  $\ell_2$ . Наибольшая точность измерений получается при равенстве плеч реохорда. Измерение повторить 4 раза.

4. Аналогично провести измерения сопротивления  $R_{x_2}$  при последовательном и параллельном соединении  $R_{x_1}$  и  $R_{x_2}$  и проверить формулы

$$R_{\text{посл.}} = R_{x_1} + R_{x_2}; \quad R_{\text{пар.}} = \frac{R_{x_1} \cdot R_{x_2}}{R_{x_1} + R_{x_2}}.$$

5. По формуле (3.2.1) вычислить величины измеренных сопротивлений.

6. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу.

Изм. сопротивл.	$R$ , Ом	№ изм.	$\ell_1$ , м	$\langle \ell_1 \rangle - \ell_{1i}$	$\ell_2$ , м	$\langle \ell_2 \rangle - \ell_{2i}$	$\langle R_x \rangle$ , Ом
		1					
		2					
		3					
		4					

7. Вычислить среднеквадратичные отклонения

$$S_{\langle \ell_1 \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (\langle \ell_1 \rangle - \ell_{1i})^2}{n(n-1)}} \quad S_{\langle \ell_2 \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (\langle \ell_2 \rangle - \ell_{2i})^2}{n(n-1)}}.$$

8. Систематическую ошибку  $\delta \ell_1 = \delta \ell_2$  определения длин плеч реохорда принять равной цене деления шкалы реохорда, а систематическую ошибку  $\delta R$  величины сопротивления магазина  $R$  оценить из класса точности магазина сопротивлений.

9. Определить относительную систематическую ошибку  $\gamma$  измерения сопротивления  $R_{x_1}$  по формуле

$$\gamma = \frac{\delta R_{x_1}}{\langle R_{x_1} \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\delta \ell_1}{\langle \ell_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\delta \ell_2}{\langle \ell_2 \rangle}\right)^2}.$$

10. Абсолютная систематическая ошибка равна

$$\delta R_{x_1} = \gamma \langle R_{x_1} \rangle.$$

11. Абсолютную случайную погрешность определить по формуле

$$\Delta R_{x_1} = t_{a,n} \cdot S_{\langle R_{x_1} \rangle},$$

где  $t_{a,n}$  – коэффициент Стьюдента, находится по таблице при  $a = 0,95$ .

Среднеквадратичное отклонение  $S_{\langle R_{x_1} \rangle}$  вычисляется по формуле

$$S_{\langle R_{x1} \rangle} = \langle R_{x1} \rangle \sqrt{\left(\frac{S_{\langle \ell_1 \rangle}}{\langle \ell_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{S_{\langle \ell_2 \rangle}}{\langle \ell_2 \rangle}\right)^2}.$$

12. Окончательный результат записать в виде

$$E = \frac{\delta R_{x1} + \Delta R_{x1}}{\langle R_{x1} \rangle} \cdot 100\%.$$

### Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 2. Электродинамика [текст] : Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 81 с.
2. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=34](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34)
3. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб. : Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=38](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38)
4. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т.: Т. 3.[текст]/ И.В. Савельев. - М.: Кнорус, 2009. - 359 с.

### Контрольные вопросы

1. Что называется силой тока, плотностью тока? Каковы их единицы?
2. Что такое сторонние силы? В чем заключается физический смысл электродвижущей силы, действующей в цепи?
3. Расчет сопротивления, напряжения, силы тока при последовательном соединении сопротивлений.
4. Расчет сопротивления, напряжения, силы тока при параллельном соединении сопротивлений.
5. Как формулируются правила Кирхгофа? На чем они основаны?

### 3.3. Изучение работы электронной лампы

**Приборы и принадлежности:** двухэлектродная электронная лампа (диод), два вольтметра, потенциометр, реостат, источники питания, ключ.

**Цель работы:** снять температурную и анодную характеристики лампы.

**Теория метода.** Сущность происходящих в диоде физических процессов состоит в следующем. При нагревании током нити накала (катода) отдельные, наиболее быстрые электроны получают энергию, достаточную для преодоления сил, удерживающих их в металле, и образуют в баллоне электронное облако, препятствующее дальнейшему вылету электронов. Если анод и катод соединить вне лампы проводником, то часть электронов, оседающих на аноде, вызовет слабый ток во внешней цепи. Если же сообщить аноду некоторое положительное напряжение, то к нему устремится большее количество электронов - ток во внешней цепи усилится. Если продолжать увеличивать напряжение на аноде, то ток будет расти, но лишь до определенного предела, пока не окажется, что все вылетающие из катода электроны попадают на анод.

Предельная величина тока, наблюдаемого при определенной температуре нити накала или определенном напряжении на аноде, называется током насыщения.

В данной работе необходимо определить зависимости силы тока от двух факторов: от температуры нити накала и от напряжения на аноде. Графики, выражающие первую и вторую зависимости, называются соответственно температурной и анодной характеристиками лампы. Эти характеристики позволяют определить область применения лампы.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рисунку 3.3.1 и показать ее преподавателю.

2. Снять температурную зависимость тока диода. Для чего:

а) с помощью потенциометра  $R_A$  на анод подать и в течение опыта поддерживать напряжение  $U_A$ , указанное на установке;

б) с помощью реостата  $R_H$  постепенно увеличивать силу тока в цепи накала и через каждые 0,5 В отсчитывать величину анодного тока;

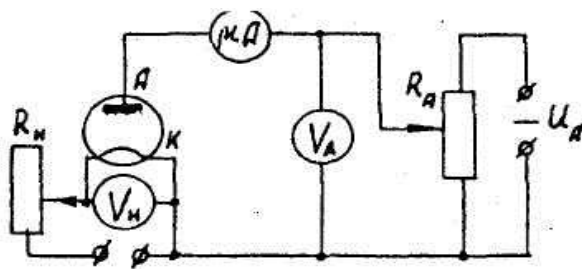


Рис. 3.3.1

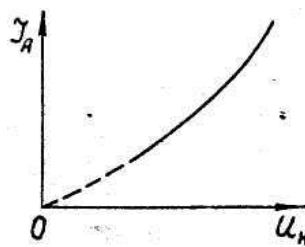


Рис. 3.3.2

в) по полученным данным построить кривую зависимости анодного тока от напряжения в цепи накала  $J_A = f(U_H)$  (рис. 3.3.2).

3. Снять анодную характеристику лампы, для чего:

а) поддерживая постоянное напряжение накала  $U_H$  (величина его указывается), постепенно увеличивать анодное напряжение и через каждые 10В отмечать величину анодного тока;

б) построить кривую зависимости анодного тока от анодного напряжения  $J_A = f(U_A)$  (рис. 3.3.3).

4. Все изменения произвести при возрастающих и убывающих значениях напряжений и результаты записать в таблицу 3.3.1.

Примечание. Графики температурной и анодной характеристик лампы на миллиметровой бумаге в соответствии с выбранным масштабом.

Таблица 3.3.1

№ п/п	$U_H, В$	$J_A, А$	$\langle J_A \rangle, А$	$U_A, В$	$J_A, А$	$\langle J_A \rangle, А$
1						
2						
⋮						

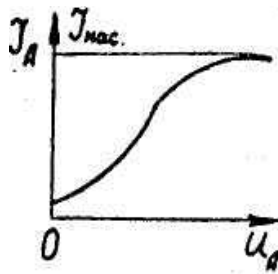


Рис. 3.3.3

### Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 2. Электродинамика [текст] : Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 81 с.
2. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=34](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34)
3. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб. : Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=38](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38)
4. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т.: Т. 3.[текст]/ И.В. Савельев. - М.: Кнорус, 2009. - 359 с.

### Контрольные вопросы

1. Что называется работой выхода электрона?
2. Что называется поверхностным скачком потенциала?
3. Какие существуют разновидности эмиссионных явлений? Дайте их определения.
4. Объясните вольтамперную характеристику для вакуумного диода.
5. Можно ли изменить силу тока насыщения вакуумного диода? Если да, то как?

### 3.4. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли

**Приборы и принадлежности:** тангенс-гальванометр, миллиамперметр, реостат, источник тока, переключатель.

**Теория метода и описание установки.** Земля представляет собой огромный шаровой магнит. В пространстве, окружающем Землю, создается магнитное поле, силовые линии которого изображены на рисунке 3.4.1. Северный магнитный полюс находится вблизи южного географического, и наоборот.

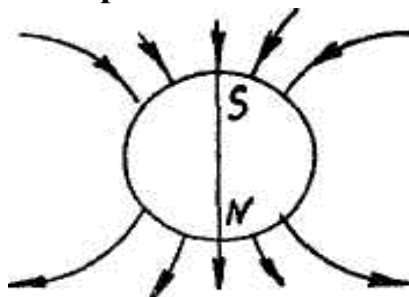


Рис. 3.4.1.

Величину проекции напряженности земного магнитного поля  $\vec{H}_z$  на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $\vec{H}_r$ . Направление этой

составляющей принимается за направление магнитного меридиана, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется плоскостью магнитного меридиана.

Для определения  $\vec{H}_r$  применяется тангенс-гальванометр. Он представляет собой плоскую вертикальную катушку радиусом  $r$  с числом витков  $N$ , указанном на тангенс-гальванометре. В центре катушки в горизонтальной плоскости расположена магнитная стрелка, которая при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану Земли.

Поворотом катушки около вертикальной оси можно совместить плоскость катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если по катушке пропустить электрический ток, то возникнет магнитное поле тока  $\vec{H}_T$ , направленное перпендикулярно плоскости витков. Под действием этого поля магнитная стрелка повернется на некоторый угол  $\alpha$ , величина которого определится выражением  $tg\alpha = H_T/H_r$ , откуда:

$$H_r = \frac{H_T}{tg\alpha}. \quad (3.4.1)$$

Напряженность магнитного поля в центре катушки тангенс-гальванометра равна

$$H_T = \frac{NJ}{2r}, \quad (3.4.2)$$

### Порядок выполнения работы

1. Штангенциркулем измерить внутренний и наружный ( $d_1$  и  $d_2$ ) диаметры катушки четыре раза и найти среднее значение диаметра. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.4.1.

2. Собрать электрическую цепь согласно рисунку 3.4.2. Установить тангенс-гальванометр так, чтобы плоскость катушки находилась в плоскости магнитного меридиана, а конец магнитной стрелки совпадал с  $0^\circ$ .

3. После проверки схемы преподавателем подключить установку к источнику питания, замкнуть переключателем П цепь и реостатом  $R$  изменить силу тока так, чтобы магнитная стрелка отклонилась на угол  $\alpha = 15^\circ$ . Записать силу тока  $J_1$ .

Таблица 3.4.1

№ опыта	$\alpha_1$ , мм	$\alpha_2$ , мм	$d = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ , мм	$\langle d \rangle$	$\langle d \rangle - d_i$	$(\langle d \rangle - d_i)^2$
1						
2						
3						
4						

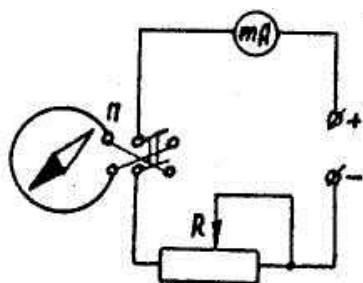


Рис. 3.4.2

4. Переключателем П изменить направление тока и вновь реостатом R установить стрелку на угол  $\alpha = 15^\circ$ . Записать значение силы тока  $J_2$  (перемена направления тока позволяет избавиться от ошибки, создаваемой неточным совпадением плоскости тангенс-гальванометра с плоскостью магнитного меридиана). Измерения тока  $J_1$  и  $J_2$  повторить четыре раза.

5. Повторить опыт для отклонения магнитной стрелки на углы  $30^\circ$  и  $45^\circ$ . Результаты занести в таблицу 3.4.2.

Таблица 3.4.2

№ опыта	$\alpha, ^\circ$	$J_1, A$	$J_2, A$	$J = \frac{J_1 + J_2}{2}$	$\langle J \rangle, A$	$\langle J \rangle - J_i$	$(\langle J \rangle - J_i)^2$
1	15						
2							
3							
4							

6. Подставляя в выражение (3.4.2) средние значения силы тока при отклонениях стрелки на углы  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$ , найти три значения  $H_\Gamma$  и из них среднее значение  $\langle H_\Gamma \rangle$ . Результаты вычислений занести в таблицу 3.4.3.

Таблица 3.4.3

№ опыта	$\alpha, ^\circ$	$\text{tg} \alpha$	$\langle d \rangle, \text{м}$	$N$	$\langle J \rangle, A$	$H_\Gamma, A/\text{м}$	$\langle H_\Gamma \rangle, A/\text{м}$
1	15						
2	30						
3	45						

7. Найти относительную систематическую ошибку  $\gamma$  определения  $H_\Gamma$  для угла  $\alpha = 15^\circ$  по формуле

$$\gamma = \frac{\delta H_\Gamma}{\langle H_\Gamma \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\delta J}{\langle J \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\delta d}{\langle d \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\delta \alpha}{\sin \alpha + \cos \alpha}\right)^2},$$

где  $\delta N$  - принять равным единице;

$\delta J$  - оценить из класса точности прибора;

$\delta d$  - принять равным цене деления нониуса штангенциркуля, а

$\delta \alpha$  - цене деления шкалы тангенс-гальванометра.

8. Абсолютная систематическая ошибка равна

$$\delta H_{\Gamma} = \gamma \langle H_{\Gamma} \rangle.$$

9. Вычислить среднеквадратичные отклонения  $S_{\langle J \rangle}$  и  $S_{\langle d \rangle}$  при отклонении стрелки на угол  $\alpha = 15^\circ$  по формулам

$$S_{\langle J \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (\langle J \rangle - J_i)^2}{n(n-1)}} \quad \text{и} \quad S_{\langle d \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (\langle d \rangle - d_i)^2}{n(n-1)}}$$

10. Найти среднеквадратичное отклонение по формуле

$$S_{\langle H_{\Gamma} \rangle} = \langle H_{\Gamma} \rangle \sqrt{\left(\frac{S_{\langle J \rangle}}{\langle J \rangle}\right)^2 + \left(\frac{S_{\langle d \rangle}}{\langle d \rangle}\right)^2}.$$

11. Абсолютную случайную ошибку  $\Delta H_{\Gamma}$  определить по формуле

$$\Delta H_{\Gamma} = t_{a,n} \cdot S_{\langle H_{\Gamma} \rangle},$$

где  $t_{a,n}$  - коэффициент Стьюдента, находится из таблицы при доверительной вероятности  $a = 0,95$  и числе измерений  $n = 12$ .

12. Относительная ошибка результата равна

$$E = \frac{\Delta H_{\Gamma} + \delta H_{\Gamma}}{\langle H_{\Gamma} \rangle} \cdot 100\%.$$

### Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 2. Электродинамика [текст] : Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 81 с.
2. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_id=34](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=34)
3. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб. : Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_id=38](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=38)
4. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т.: Т. 3.[текст]/ И.В. Савельев. - М.: Кнорус, 2009. - 359 с.

### Контрольные вопросы

1. Что называют индукцией магнитного поля? Каково направление вектора  $\vec{B}$ ?
2. Запишите закон Био-Савара-Лапласа и объясните его физический смысл.
3. Рассчитайте, применяя закон Био-Савара-Лапласа, магнитное поле в центре кругового проводника с током.
4. Связь напряженности магнитного поля с магнитной индукцией.
5. Почему магнитное поле является вихревым? Какая теорема доказывает вихревой характер магнитного поля?

### 3.5. Определение удельного заряда электрона

**Приборы и принадлежности:** электронная лампа, соленоид, миллиамперметр, два вольтметра, амперметр, потенциометр, два реостата, ключ, источники питания.

**Теория метода и описание установки.** Электроны, испускаемые раскаленным катодом, под действием электрического поля между катодом и анодом лампы движутся по радиальным траекториям. Если двухэлектродную лампу поместить в аксиальное магнитное поле (на лампу надеть соленоид), то на движущийся заряд будет действовать сила Лоренца, численное значение которой равно

$$F = evB,$$

где  $e$  - заряд электрона,  $v$  - его скорость,  $B$  - индукция внешнего магнитного поля.

Магнитное поле (сила Лоренца) дает только искривление траектории полета электронов, и по мере усиления индукции магнитного поля траектории электронов будут все более искривляться, и при некотором "критическом" значении индукции магнитного поля электроны перестанут достигать анода и по замкнутым траекториям будут возвращаться обратно на катод. Если пренебречь начальными скоростями электронов и считать, что поток электронов движется с некоторой средней скоростью, то сила Лоренца будет являться центростремительной силой, т.е.

$$evB = \frac{mv^2}{r}, \quad (3.5.1)$$

где  $m$  - масса электрона,  $r$  - радиус кривизны траектории электронов в магнитном поле. Так как нить накала катода весьма тонка по сравнению с диаметром цилиндра анода  $2R$ , то радиус кривизны траектории электронов будет равен половине радиуса анода, т.е.  $r=R/2$ .

Из формулы (3.5.1), учитывая значение  $r$ , можно определить удельный заряд электрона для критического значения индукции  $B_{кр}$  магнитного поля

$$\frac{e}{m} = \frac{2v}{RB_{кр}} = \frac{v_{\max}}{RB_{кр}}, \quad \text{т.к. } v = \frac{v_{\max}}{2}.$$

Скорость электронов можно узнать из формулы работы перемещения заряда от катода к аноду (при разности потенциалов между катодом и анодом  $U_A$ ). Эта работа равна кинетической энергии электрона

$$eU_A = mv_{\max}^2/2,$$

отсюда

$$v_{\max} = \sqrt{2U_A \cdot \frac{e}{m}}. \quad (3.5.2)$$

Подставляя далее вместо  $v_{\max}$  ее значение, получим

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_A}{R^2 B_{кр}^2}. \quad (3.5.3)$$

Аксиальное магнитное поле создается соленоидом, внутри которого помещается электронная лампа. Индукция магнитного поля соленоида равна

$$B = \frac{\mu_0 J_c N}{2L} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2), \quad (3.5.4)$$

где  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная,



$J_C$  - сила тока, протекающего по соленоиду,  
 $N$  и  $L$  – число витков и длина соленоида,  
 $\beta_1$  и  $\beta_2$  - углы, под которыми из центра поля соленоида видны радиусы крайних витков соленоида.

По геометрическим соображениям можно записать, что

$$\cos \beta_1 = L/\sqrt{D^2 + L^2}, \quad \cos \beta_2 = -L/\sqrt{D^2 + L^2}, \quad (3.5.5)$$

где  $D$  – средний диаметр витков соленоида.

С учетом выражений (3.5.4) и (3.5.5) равенство (3.5.3) окончательно примет вид

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_A (D^2 + L^2)}{R^2 \mu_0^2 J_C^2 N^2}. \quad (3.5.6)$$

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.5.1. Схема содержит цепь соленоида с реостатом  $R_3$  для изменения силы тока в цепи соленоида, цепь катода лампы с реостатом  $R_1$  и цепь анода лампы с потенциометром  $R_2$ .

### Порядок выполнения работы

1. Собрать установку по схеме (рис. 3.5.1).

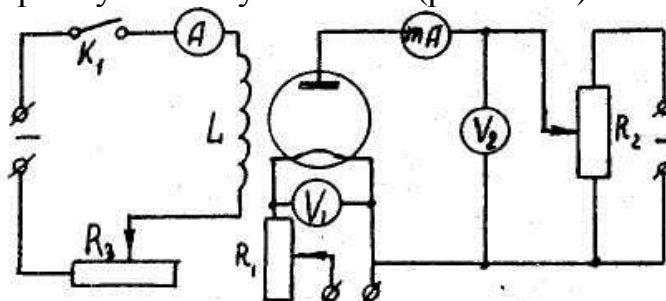


Рис. 3.5.1

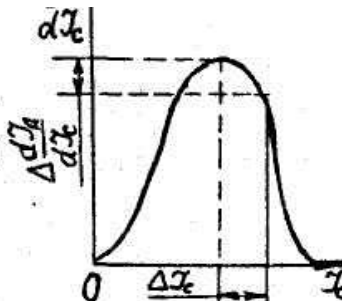


Рис. 3.5.2

2. После проверки схемы преподавателем включить напряжение цепи катода и через 1-2 мин. прогрева лампы реостатом  $R_1$  по вольтметру  $V_1$  установить напряжение, указанное преподавателем.

3. Включить напряжение анода и потенциометром  $R_2$  установить по вольтметру  $V_2$  такое напряжение, чтобы стрелка миллиамперметра в цепи анода установилась на одном из последних делений. Это значение анодного напряжения  $U_A$  занести в таблицу 3.5.1.

4. Включить цепь соленоида и с помощью реостата  $R_3$  снять зависимость анодного тока  $J_A$  от тока в соленоиде  $J_C$ . Взять не менее 15-20 измерений  $J_A$  через равные интервалы тока в соленоиде  $\Delta J_C$ .

Таблица 3.5.1

$J_C, A$	
$J_A, mA$	
$dJ_A, mA$	

В третью строку таблицы 1 записать разность  $dJ_A$  двух соседних отсчетов анодного тока  $J_A$ , соответствующих двум соседним значениям тока соленоида  $J_C$ . Величина  $dJ_A$  характеризует крутизну спада анодного тока под действием магнитного поля, создаваемого током соленоида. Наибольшая величина спада анодного тока  $dJ_A$  соответствует критическому току соленоида  $J_{C.кр.}$ . Значение  $J_{C.кр.}$  берется из первой строки таблицы 3.5.1, соответствующее максимальному значению  $dJ_A$  - из третьей строки таблицы 1. Наглядное представление определения  $J_{C.кр.}$  дает график зависимости  $dJ_A/dJ_C$ , построенный по данным таблицы 1 (рис.3.5.2).

5. По формуле (3.5.6) определить удельный заряд электрона, подставляя вместо  $J_C$  значение  $J_{C.кр.}$ . Число витков соленоида  $N$ , длина и диаметр соленоида, а также радиус анода лампы приведены на установке.

6. По полученным данным, пользуясь формулой (3.5.2), вычислить скорость электрона, а зная заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, вычислить массу электрона  $m$ .

7. Результаты вычислений занести в таблицу 3.5.2.

Таблица 3.5.2

$U_A, B$	$J_{C.кр.}, A$	$L, м$	$D, м$	$N$	$\mu_0$	$R$	$e/m$	$V, м/с$	$M, кг$

8. Найти относительную систематическую ошибку  $\gamma$  определения  $\frac{e}{m}$ .

$$\gamma = \frac{\delta(e/m)}{e/m} = \sqrt{\left(\frac{\delta U_A}{U_A}\right)^2 + \left(\frac{2D\delta D + 2L\delta L}{D^2 + L^2}\right)^2 + \left(\frac{2\delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{2\delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{2\delta J_{C.кр.}}{J_{C.кр.}}\right)^2},$$

где  $\delta U_A$  и  $\delta J_{C.кр.}$  оценить из класса точности применяемых приборов.

Погрешности определения геометрических размеров соленоида и числа витков, а также радиуса анода лампы указаны в таблице к лабораторной работе.

9. Абсолютная систематическая ошибка равна

$$\delta\left(\frac{e}{m}\right) = \gamma \cdot \frac{e}{m}.$$

10. Абсолютную случайную погрешность определить по формуле

$$\Delta\left(\frac{e}{m}\right) = t_{a,n} \cdot S_{(e/m)},$$

где  $t_{a,n}$  - коэффициент Стьюдента (находится по таблице) при доверительной вероятности  $a = 0,95$ . Среднеквадратичное отклонение  $S_{(e/m)}$  вычислить по формуле

$$S_{(e/m)} = \frac{e}{m} \cdot S_{J_{C.кр.}} / J_{C.кр.}.$$

Среднеквадратичное отклонение  $S_{J_{c.кр.}}$  можно найти графическим методом из кривой  $dJ_a/dJ_C = f(J_C)$  (см. рис. 3.5.2) следующим образом.

10.1. В соответствии с классом точности прибора, измеряющего анодный ток, найти относительную погрешность определения максимального значения  $dJ_a/dJ_C$ , умножив  $dJ_a/dJ_C$  на относительную погрешность измерения  $J_a$ .

10.2. Определить координаты точек пересечения отсчитанного от максимума отрезка с кривой  $dJ_a/dJ_C$ , т.е. спроектировать величину

$$\frac{dJ_a}{dJ_{C(макс)}} \cdot \frac{\Delta J_a}{J_a} = \Delta \frac{dJ_a}{dJ_C} \quad \text{на ось } J_C \text{ (см. рис. 3.5.2).}$$

10.3. Отсчитать по оси  $J_C$  погрешность определения  $J_C$  от точки, соответствующей максимуму функции в обе стороны. Эту величину и принять за  $S_{J_C}$ .

11. Записать окончательный ответ в виде

$$\frac{e}{m} = \frac{e}{m} \pm \left[ \Delta \frac{e}{m} + \delta \left( \frac{e}{m} \right) \right]$$

при доверительной вероятности  $a=0,95$ .

12. Найти относительную ошибку результата, равную

$$E = \frac{\Delta(e/m) + \delta(e/m)}{e/m} \cdot 100\% .$$

### Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 2. Электродинамика [текст] : Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 81 с.
2. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=34](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34)
3. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб. : Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=38](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38)
4. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т.: Т. 3.[текст]/ И.В. Савельев. - М.: Кнорус, 2009. - 359 с.

### Контрольные вопросы

1. Что такое сила Лоренца?
2. Чему равна и как направлена сила, действующая на отрицательный заряд, движущийся в магнитном поле?
3. Чему равна работа силы Лоренца при движении заряженной частицы в магнитном поле?
4. Что такое удельный заряд? Какова единица измерения?

5. Как будет двигаться заряженная частица, влетевшая в однородное магнитное поле к вектору  $\vec{B}$  под углом  $\frac{\pi}{2}$ ? Когда заряженная частица движется в магнитном поле по спирали?

### 3.6. Определение индуктивности катушки

**Приборы и принадлежности:** исследуемая катушка, сердечник, вольтметр, амперметр, реостат, источник тока.

**Теория метода и описание установки.** Если в проводнике изменяется сила тока, то в нем возникает электродвижущая сила (ЭДС) самоиндукции, препятствующая этому изменению. ЭДС самоиндукции пропорциональна изменению силы тока за единицу времени  $\mathcal{E} = -LdJ/dt$ .

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется индуктивностью контура и зависит от формы и размеров контура и магнитной проницаемости  $\mu$  окружающей среды. При пропускании переменного тока по катушке индуктивности ее сопротивление переменному току будет равно следующему выражению:

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}, \quad (3.6.1)$$

где  $R$  – активное сопротивление катушки,  
 $\omega = 2\pi\nu$  – круговая частота переменного тока,  
 $L\omega$  – индуктивное сопротивление катушки.

Закон Ома можно написать в виде

$$J = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} = \frac{U}{Z}. \quad (3.6.2)$$

Из равенств (3.6.1) и (3.6.2) следует, что индуктивность катушки равна

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}. \quad (3.6.3)$$

#### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 3.6.1. Катушку подключить с числом витков, указанным преподавателем. Активное сопротивление катушки приведено на установке.

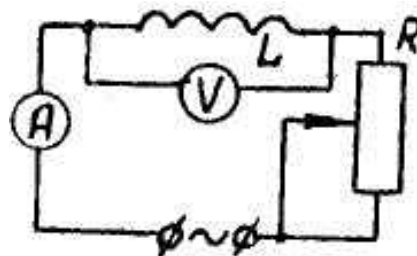


Рис. 3.6.1

2. Замкнуть цепь и определить силу тока  $J$ , идущего через катушку, для четырех различных значений напряжения  $U$  на ее концах.

3. Определить значение  $Z$  по формуле  $Z = U/J$  и найти среднее значение  $\langle Z \rangle$ .

4. По формуле (3.6.3) определить искомую индуктивность катушки  $L$ .

5. Повторить опыт, вставив в катушку сердечник, и найти индуктивность катушки с сердечником. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.6.1.

Таблица 3.6.1

№ опыта	$U, В$	$J, А$	$Z, Ом$	$\langle Z \rangle, Ом$	$R, Ом$	$\omega, с^{-1}$	$\langle L \rangle, Гн$
Катушка без сердечника $N = \dots$ витков							
1							
2							
3							
4							
Катушка с сердечником $N = \dots$ витков							

7. Найти относительную систематическую ошибку  $\gamma$  вычисления  $L$  по формуле

$$\gamma = \frac{\delta L}{\langle L \rangle} = \sqrt{\left(\frac{U \delta U}{U^2 - J^2 R^2}\right)^2 + \left(\frac{R^2 J \delta J}{U^2 - J^2 R^2}\right)^2 + \left(\frac{J^2 R \delta R}{U^2 - J^2 R^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta J}{J}\right)^2 + \left(\frac{\delta v}{v}\right)^2},$$

где  $\delta U$  и  $\delta J$  оценить исходя из класса точности приборов,  $\delta R$  и  $\delta v$  взять из таблицы, прилагаемой к установке.

7. Абсолютную систематическую ошибку найти по формуле

$$\delta L = \gamma \langle L \rangle.$$

8. Абсолютную случайную ошибку  $\Delta L$  оценить по формуле

$$\Delta L = t_{a,n} \cdot S \langle L \rangle,$$

где  $t_{a,n}$  - коэффициент Стьюдента, находится из таблицы при доверительной вероятности  $a = 0,95$  и числе измерений  $n = 4$ .

Среднеквадратичное отклонение  $S_{\langle L \rangle}$  в определении индуктивности  $L$  найти по формуле

$$S_{\langle L \rangle} = \langle L \rangle \frac{\langle Z \rangle S_Z}{Z^2 - R^2}, \text{ где } S_Z = \sqrt{\frac{\sum (\langle Z \rangle - Z_i)^2}{n(n-1)}}.$$

9. Записать окончательный результат в виде

$$L = \langle L \rangle \pm (\Delta L + \delta L)$$

при доверительной вероятности  $a = 0,95$ .

10. Найти относительную ошибку результата

$$E = \frac{\Delta L + \delta L}{\langle L \rangle} \cdot 100\%.$$

### Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 2. Электродинамика [текст] : Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 81 с.
2. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=34](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34)
3. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб. : Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=38](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38)
4. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т.: Т. 3.[текст]/ И.В. Савельев. - М.: Кнорус, 2009. - 359 с.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. Что такое явление самоиндукции?
3. В чем заключается физический смысл индуктивности контура?
4. От чего зависит индуктивное сопротивление?
5. Нарисуйте и объясните векторную диаграмму для цепи переменного тока с последовательно включенным резистором и катушкой индуктивности.

### 3.7. Снятие петли гистерезиса для стали

**Приборы и принадлежности:** стальной стержень, две катушки, компас, амперметр, реостат, переключатель, источник тока.

**Теория метода и описание установки.** Под действием внешнего магнитного поля внутри тела создается дополнительное поле одинакового направления с внешним полем. Результатом сложения магнитных полей в теле является его магнитная индукция  $B$ , которая связана с направлением внешнего поля соотношением

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

где  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная,  
 $\mu$  - магнитная проницаемость среды.

В зависимости от величины  $\mu$  все тела делятся на три класса: диамагнитные ( $\mu < 1$ ), парамагнитные ( $\mu > 1$ ) и ферромагнитные ( $\mu \gg 1$ ).

Диа- и парамагнитные – слабомагнитные вещества, их магнитная проницаемость близка к единице. У ферромагнетиков, к которым относится железо и сталь, значение  $\mu$  очень велико и зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Кроме того, на величину  $\mu$ , а следовательно, и на  $B$ , оказывает влияние намагничивание, которому подвергался ферромагнетик ранее. Рассмотрим это явление подробнее.

Если ненамагниченный ферромагнетик поместить в постепенно увеличивающееся внешнее поле, то  $B$  будет плавно возрастать до насыщения (отрезок  $OA$ , (рис. 3.7.1)). Если, дойдя до точки  $A$ , начать уменьшать намагничивающее поле  $H$ , то индукция  $B$  будет уменьшаться по кривой  $AD$ , т.е. с некоторым отставанием. Это отставание называется гистерезисом. Величина

$B=OD$  называется остаточным намагничиванием. Для полного размагничивания необходимо изменить направление напряженности  $H$ . Величина  $H = OK$ , при которой  $B = 0$ , называется коэрцитивной силой.

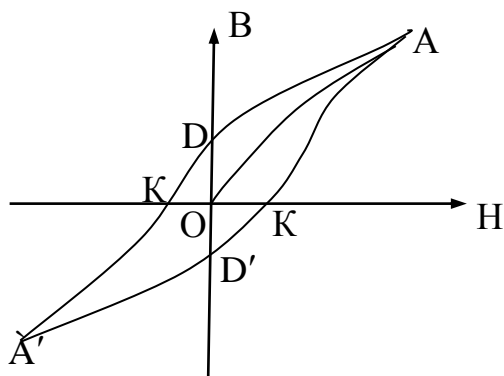


Рис. 3.7.1

При дальнейшем увеличении напряженности поля вновь достигается насыщение (отрезок  $KA'$ ). Если затем напряженность магнитного поля уменьшить до нуля и, изменив направление, увеличить, то получим кривую  $A'D'K'A$ . Замкнутая кривая, выражающая зависимость  $B = f(H)$ , называется петлей гистерезиса. Петлю

гистерезиса объясняют наличием в ферромагнитных материалах областей намагничивания, называемых доменами.

Для снятия петли гистерезиса используется следующий метод. Берут две катушки  $A$  и  $B$ , между которыми помещают компас  $K$  (рис. 3.7.2). Ось катушек

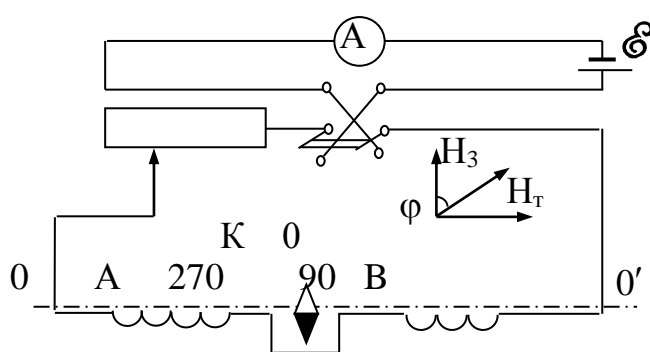


Рис. 3.7.2

$OO'$  должна быть перпендикулярна магнитной стрелке, которую устанавливают в плоскости магнитного меридиана Земли  $H_З$  так, чтобы один из концов ее стоял на нуле. Пропуская по катушкам ток и изменяя при этом расстояние между катушками и компасом, можно добиться взаимной компенсации магнитных полей

катушек, и стрелка не будет отклоняться. Если затем в одну из катушек поместить железный или стальной стержень, то равновесие нарушится – стрелка отклонится на некоторый угол  $\varphi$  (рис. 3.7.2).

Меняя величину и направление тока в катушках и наблюдая за отклонением стрелки, можно получить замкнутую кривую, выражающую зависимость между углом  $\varphi$  и величиной тока  $J$  [ $tg\varphi = f(J)$ ]. Эта кривая аналогична кривой петли гистерезиса  $B = f(H)$ , так как напряженность поля в катушке пропорциональна току, текущему по обмотке, а магнитное поле стержня ( $H$  стержня) пропорционально индукции  $B$ .

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь (см. рис. 3.7.2). Компас поместить на расстоянии 10 – 20 см от каждой катушки. Стрелка компаса  $K$  должна быть перпендикулярна осям катушек и стоять на нуле. Все посторонние железные и стальные предметы удалить.

2. Пропустить по обмоткам катушек, соединенных последовательно, ток около 1–2А и, передвигая катушки, добиться, чтобы стрелка компаса не отклонялась от установленного положения. Затем реостатом уменьшить ток до минимума и выключить ток. После этого катушки передвигать нельзя.

3. Взять железный или стальной стержень и, если он намагничен (притягивает железные опилки), размагнитить его переменным током на специальной установке. Затем вложить стержень в одну из катушек так, чтобы его середина совпадала с серединой катушки.

4. Передвигая очень медленно и плавно ползунок реостата, установить значения токов, заданные в таблице, и взять отсчеты углов  $\varphi$ . Доведя ток до одного ампера, таким же образом уменьшить ток до нуля, изменить направление тока переключателем  $P$  и повторить измерения в обратном направлении, и т.д. При отклонении стрелки в другую сторону считать углы отрицательными. Результаты измерений свести в таблицу 3.7.1.

Таблица 3.7.1

Ток $J$ , А	Участок $OA$		Участок $AD$		Участок $DA'$		Участок $A'D'$		Участок $D'A$	
	$\varphi$	$tg\varphi$	$\varphi$	$tg\varphi$	$\varphi$	$tg\varphi$	$\varphi$	$tg\varphi$	$\varphi$	$tg\varphi$
0										
0,1										
0,3										
0,5										
0,7										
0,9										
1,0										

5. Откладывая по оси абсцисс величину тока, а по оси ординат  $tg\varphi$ , получить замкнутую кривую  $tg\varphi = f(J)$ .

### Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 2. Электродинамика [текст] : Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 81 с.
2. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=34](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34)
3. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб. : Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=38](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38)
4. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т.: Т. 3.[текст]/ И.В. Савельев. - М.: Кнорус, 2009. - 359 с.

### Контрольные вопросы

1. Что такое намагничённость, магнитная восприимчивость, магнитная проницаемость вещества?



2. Что такое диамагнетики и парамагнетики? В чем различие их магнитных свойств?
3. Каков механизм намагничивания ферромагнетиков?
4. Какую температуру для ферромагнетиков называют точкой Кюри?
5. Объясните петлю гистерезиса ферромагнетика. Что такое магнитострикция?

### 3.8. Определение скорости распространения волны в проволоке

**Приборы и принадлежности:** прибор для получения стоячих волн, микрометр, набор грузов.

**Теория метода и описание установки.** Если в растянутой тонкой проволоке каким-либо способом создать поперечные колебания определенного участка проволоки, то по ней будет распространяться поперечная волна со скоростью

$$v = \sqrt{F/(D \cdot S)} = \sqrt{\frac{4mg}{\pi d^2 D}}, \quad (3.8.1)$$

где  $F$  – сила натяжения проволоки,  
 $S$  – площадь поперечного сечения,  
 $D$  – плотность вещества проволоки.

Один конец тонкой медной проволоки длиной 150 – 170 см закреплен в штативе. Ко второму концу, перекинутому

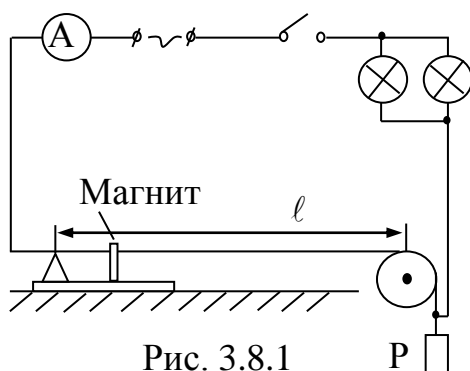


Рис. 3.8.1

через блок, подвесить гирию массой 100 г (рис. 3.8.1). Сила тяжести гири и будет являться силой натяжения проволоки. На первом штативе укреплен дугообразный магнит так, что проволока располагается между полюсами магнита. По проволоке пропускают переменный ток от сети через ламповый реостат. Так как по проволоке протекает переменный ток, то на проволоку действует

сила Ампера, которая вызовет колебательное движение участка проволоки, находящегося между полюсами магнита, с частотой переменного тока  $\nu$ . По проволоке начнет распространяться бегущая волна со скоростью  $v$ . Дойдя до блока, волна отразится и будет перемещаться навстречу другой бегущей волне. В результате непрерывного наложения бегущих и отраженных волн в проволоке возникнут стоячие волны с ясно выраженными узлами и пучностями. Меняя натяжение проволоки и ее длину  $l$ , можно менять число стоячих волн  $n$ .

Длина стоячей волны  $\lambda_{ст.} = l/n$ . Длина бегущей волны  $\lambda_{бег.} = 2\lambda_{ст.}$ .

Так как  $\lambda_{бег.} = v \cdot T = v/\nu$ , то получаем, что скорость бегущей волны равна

$$v = \lambda_{бег.} \cdot \nu = \frac{2l}{n} \nu. \quad (3.8.2)$$

### Порядок выполнения работы

1. Проверить схему (см. рис. 3.8.1). Микрометром измерить толщину проволоки три раза в разных местах и найти среднее значение диаметра  $\langle d \rangle$ . Результаты занести в таблицу 3.8.1.

2. К концу проволоки подвесить груз 100 г, включить установку в сеть 220В. Медленно передвигать магнит на штативе и добиться четких стоячих волн. Подсчитать число стоячих волн  $n$  и записать длину проволоки  $l$  в таблице 3.8.2.

Таблица 3.8.1

№ измерения	$d$ , мм	$\langle d \rangle$ , мм	$\langle d \rangle - d_i$	$(\langle d \rangle - d_i)^2$
1				
2				
3				

3. Сместить штатив с магнитом и вновь добиться четких стоячих волн. Эксперимент повторить три раза, каждый раз записывать величину  $l$  при неизменном значении  $n$ . Найти среднее значение  $\langle l \rangle$ .

При  $m = 100$  г

Таблица 3.8.2

№ измерения	$n$	$l$ , м	$\langle l \rangle$ , м	$\langle l \rangle - l_i$	$(\langle l \rangle - l_i)^2$
1					
2					
3					

4. Аналогичные измерения провести с гирями 200 и 300 г по формулам (3.8.1) и (3.8.2) вычислить по три значения скорости бегущей волны, найти средние значения и сопоставить их между собой. Результаты вычислений свести в таблице 3.8.3.

Таблица 3.8.3

№ опыта	$m$ , кг	$\langle l \rangle$ , м	$n$	$v_1$ , м/с по ф. (3.8.1)	$\langle v_1 \rangle$ м/с	$v_2$ , м/с по ф. (3.8.2)	$\langle v_2 \rangle$ м/с
1							
2							
3							

5. Вычислить среднеквадратичные отклонения  $S_{\langle d \rangle}$  и  $S_{\langle l \rangle}$

$$S_{\langle d \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (\langle d \rangle - d_i)^2}{n(n-1)}}, \quad S_{\langle l \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (\langle l \rangle - l_i)^2}{n(n-1)}}.$$

6. Найти относительные систематические ошибки  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  вычисления  $v_1$  и  $v_2$  по формулам (3.8.1) и (3.8.2) из выражений

$$\gamma_1 = \frac{\delta v_1}{\langle v_1 \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\delta m}{2m}\right)^2 + \left(\frac{\delta g}{2g}\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{2D}\right)^2 + \left(\frac{\delta d}{\langle d \rangle}\right)^2},$$

$$\gamma_2 = \frac{\delta v_2}{\langle v_2 \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\delta l}{\langle l \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\delta v}{v}\right)^2},$$

где значения  $\delta m$ ,  $\delta g$ ,  $\delta v$ ,  $\delta D$  взять из таблицы, прилагаемой к установке,  $\delta d$  и  $\delta l$  принять равной цене деления микрометра и линейки.

7. Абсолютные систематические ошибки найти по формулам

$$\delta v_1 = \gamma_1 \langle v_1 \rangle, \quad \delta v_2 = \gamma_2 \langle v_2 \rangle.$$

8. Абсолютные случайные ошибки  $\Delta v_1$  и  $\Delta v_2$  определить по формулам

$$\Delta v_1 = t_{a,n} \langle v_1 \rangle \frac{S\langle d \rangle}{\langle d \rangle}, \quad \Delta v_2 = t_{a,n} \langle v_2 \rangle \frac{S\langle l \rangle}{\langle l \rangle},$$

где  $t_{a,n}$  - коэффициент Стьюдента, находится из таблицы при доверительной вероятности  $a = 0,95$  и числе измерений  $n = 3$ .

9. Записать окончательный результат в виде

$$v_1 = \langle v_1 \rangle \pm (\Delta v_1 + \delta v_1), \quad v_2 = \langle v_2 \rangle \pm (\Delta v_2 + \delta v_2) \quad \text{при } a = 0,95.$$

10. Найти относительную ошибку результата

$$E_1 = \frac{\Delta v_1 + \delta v_1}{\langle v_1 \rangle} \cdot 100\%, \quad E_2 = \frac{\Delta v_2 + \delta v_2}{\langle v_2 \rangle} \cdot 100\%.$$

11. Сравнить разность  $|v_1 - v_2|$  с суммарной ошибкой  $(\Delta v_2 + \delta v_2)$ . Должно выполняться условие  $|v_1 - v_2| \leq (\Delta v_2 + \delta v_2)$ .

### Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 2. Электродинамика [текст] : Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 81 с.
2. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=34](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34)
3. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб. : Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=38](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38)
4. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т.: Т. 3. [текст]/ И.В. Савельев. - М.: Кнорус, 2009. - 359 с.

### Контрольные вопросы

1. Что такое волновой процесс?
2. Что называется длиной волны? Какова связь между длиной волны, скоростью и периодом?
3. Что называется поперечной волной, продольной? Когда они возникают?
4. Что такое стоячая волна?
5. Чем стоячая волна отличается от бегущей?

Бахмат Владимир Ильич  
Борисовский Василий Васильевич

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов  
технических направлений всех форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 17.12.15. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,69. Тираж 120 экз. Заказ 151512. Рег. № 142.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института  
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.