

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам по разделу
«ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»

Ленинград
1990

Лабораторная работа 4.1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА И ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы

Цель лабораторной работы – определение магнитного потока, пронизывающего площадь контура, внесенного в зазор между двумя катушками, и исследование зависимости индукции магнитного поля, создаваемого катушками, от силы тока, протекающего по ним; расстояния между ними; числа витков катушек и наличия сердечников в катушках.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

При подготовке к лабораторной работе следует изучить теоретический материал по следующим разделам: магнитное поле токов в вакууме [3, с.150-178; 4, с.114-125; 5, с.187-193; 226-234]; электромагнитная индукция [3, с.178-181; 4, с. 181-193; 5, с.249-282]; магнетизма [3, с.213-228; 4, с.197-198; 5, с.282-305].

Особое внимание при подготовке к работе обратите на то, что движущиеся заряды (токи) являются источниками магнитного поля, имеющего вихревой характер. Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} .

Определите величину индукции магнитного поля и единицы ее измерения Тесла (Тл) на основании силы Лоренца, т.е. силы, с которой магнитное поле действует на заряд q , движущийся в нем со скоростью \vec{V} :

$$\vec{F} = q[\vec{V}, \vec{B}] \quad (1)$$

или

$$F = qV B \sin(\angle \vec{V}, \vec{B}). \quad (1a)$$

Здесь \vec{B} – индукция магнитного поля, определяемая как физическая величина, численно равная силе, действующей со стороны магнитного поля на единичный положительный заряд, движущийся с единичной скоростью перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.

$$B = \frac{F}{q \cdot V}. \quad (1b)$$

За единицу измерения индукции магнитного поля Тл (Тесла), принята индукция такого магнитного поля, в котором на заряд в 1 Кл, движущийся со скоростью 1 м/с перпендикулярно силовым линиям, действует сила в 1 Н.

Введите скалярную характеристику магнитного поля – магнитный поток Φ или поток вектора магнитной индукции (рис.1.1) – как величину, равную

$$\Phi = \int B_n dS. \quad (2)$$

Обратите внимание, что в случае плоской площадки (рис. I.1.2) выраже-

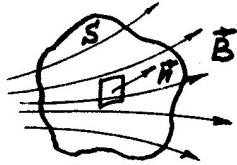


Рис. I.1.1

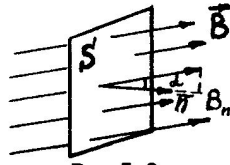


Рис. I.1.2

ние (2) для потока индукции принимает простой вид

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B_n S, \quad (3)$$

где $B_n = B \cos \alpha$. Здесь α - угол между направлением нормали \vec{n} к площадке и направлением индукции \vec{B} . B_n - проекция вектора \vec{B} на нормаль \vec{n} .

Если в (2) и (3) выразить индукцию магнитного поля B в Тл, а S - в m^2 , то магнитный поток Φ окажется выраженным в Веберах (Вб). Поток магнитной индукции в 1 Вб называется такой поток, который проходит через площадку в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно линиям магнитной индукции в магнитном поле с индукцией в 1 Тл .

Если контур состоит не из одного, а из N витков, то полный магнитный поток через такой контур (число потоко-сцеплений)

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i, \quad (4)$$

где Φ_i - поток, сцепленный с одним i -м витком. В частном случае, когда $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 \dots = \Phi$, т.е. поток магнитной индукции через все витки одинаков (как это имеет место в настоящей работе)

$$\Psi = N\Phi. \quad (5)$$

Изучите явление электромагнитной индукции, которое заключается в том, что при всяком изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную проводящим контуром, в последнем возникает электродвижущая сила индукции

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (6)$$

Знак "-" в формуле (6) является математическим выражением правила

Ленца, согласно которому ток всегда направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать причине, его вызывающей.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Магнитный поток через проводящий контур находится из следующих соображений.

Величина индукционного тока в контуре может быть определена по закону Ома $I_i = \mathcal{E}_i / R$, где R - сопротивление контура. Этот ток за время dt перенесет заряд

$$dq = I_i \cdot dt = \frac{\mathcal{E}_i}{R} dt = - \frac{d\Psi}{R} = -N \frac{d\Phi}{R}.$$

Производя интегрирование последнего равенства, получим формулу для расчета заряда q , который протекает по контуру с сопротивлением R при изменении пронизывающего его магнитного потока от Ψ_1 до

$$\Psi_2: \quad \int_0^q dq = - \frac{1}{R} \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} d\Psi, \quad q = \frac{\Psi_1 - \Psi_2}{R} = N \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} = -N \frac{\Delta\Phi}{R}. \quad (7)$$

Если $\Phi = \Phi_1$ ($\Phi_2 = 0$), то этот поток можно измерить, зная протекающий заряд q и параметры контура N и R :

$$\Phi = \frac{qR}{N}. \quad (8)$$

В лабораторной установке, схема которой приведена на рис. I.3 и I.4, магнитный поток измеряется в зазоре между катушками K_1 и K_2 . Величина тока в катушках меняется источником питания ИП и контролируется амперметром А.

Контур P изготовлен из пластмассы в виде рамки, на которую намотано N_0 витков провода. Сопротивление цепи контура R складывается из сопротивления гальванометра R_g и сопротивления витков рамки R_p . $R = R_g + R_p$. Величины R_g и R_p известны (даны на рабочем месте). Заряд q , перенесенный индукционным током в витках этой рамки, измеряется гальванометром Г.

Гальванометр представляет собой магнитоэлектрический прибор с подвижной частью (рамкой) на растяжках. Принцип действия гальвано-

Зная величину магнитного потока и площадь рамки, можно определить величину магнитной индукции

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (II)$$

Величины S , B , и N_0 даны на рабочем месте.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется в зависимости от варианта, заданного преподавателем. Графики Φ и B строятся на одном листе миллиметровки,

Номер варианта	Пункты выполнения	Дополн. задание	Оценка погрешности для измерения
1	1,2,3,5	1,2,4	1
2	1,2,7,8	2,3,5	2
3	1,3,4,6	2,3,4	3

1. Собрать схему, показанную на рис. I.3, включив в цепь только закрепленную неподвижно катушку K_1 . При этом использовать клеммы А и В катушки $N_1 = 3600$ витков и "+" и "-" источника питания ИП. Измерительный контур подключается к клеммам гальванометра, расположенным на его задней панели.

Внимание! Без проверки схемы лаборантом в сеть ее не включать!

2. Исследовать зависимость потока Φ и индукции B магнитного поля от координаты X точки на оси катушек К при постоянном токе в ней. Значение силы тока дано на рабочем месте. Измерения провести для двух случаев:

- без железного сердечника;
- с железным сердечником в катушке.

Для этого:

2.1. Вынуть сердечники из катушек. Вывести стрелку амперметра корректором на нулевую отметку шкалы. Установить необходимую величину тока в катушке при помощи регулятора на передней панели источника питания, предварительно подобрав нужный предел измерения амперметра.

2.2. Подобрать с помощью переключателя гальванометра необходимую чувствительность и поместить контур в точку с координатой X . Замечание. Регулятор чувствительности в положении переключателя "x10" и "x100" увеличивает величины постоянных по току и напряжению в 10 и 100 раз, соответственно.

2.3. Вынуть контур из магнитного поля и измерить первый отброс

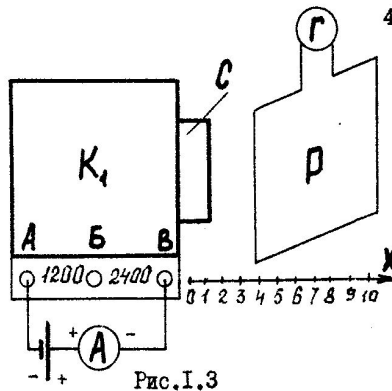


Рис. I.3

K_1 - катушка с числом витков
 P - контур
 $Г$ - гальванометр
 A - амперметр
 $ИП$ - источник питания
 C - стальной сердечник
 X - координатная линейка
 Число витков катушки между клеммами:
 A и B - 1200 витков
 B и V - 2400 витков

метра основан на взаимодействии в воздушном зазоре магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, и тока, протекающего в обмотке подвижной рамки. В результате этого взаимодействия возникает вращающий момент, отклоняющий подвижную часть прибора.

Угол поворота рамки зависит от величины тока, протекающего по обмотке рамки и противодействующего момента растяжек.

При прохождении тока рамка поворачивается на угол, при котором противодействующий момент становится равным вращающему. В результате угол отклонения подвижной части будет пропорционален току, протекающему по обмотке рамки.

Успокоение движения подвижной части осуществляется тормозными гоками, возникающими в обмотке при ее перемещении в магнитном поле постоянного магнита.

К растяжке, на которой подвешена рамка, прикреплено маленькое зеркало, дающее световой "зайчик" на шкале прибора.

Кратковременный импульс тока, протекающий через рамку гальванометра, вызывает отброс светового "зайчика"; пропорциональный величине q протекшего заряда:

$$q = B_0 \cdot n, \quad (9)$$

где B_0 - баллистическая постоянная гальванометра, численно равная заряду, который вызывает отброс светового "зайчика" на одно деление шкалы; n - число делений по шкале гальванометра, равное первому отбросу светового "зайчика".

После подстановки выражения (9) в (8) получаем

$$\Phi = \frac{B_0 \cdot n \cdot R}{N_0} \quad (10)$$

светового "зайчика" n по шкале гальванометра. Измерения повторить 5 раз и определить среднее значение \bar{n} . Все измерения занесутся в табл. I.

Замечание. Так как величина ЭДС индукции зависит от скорости изменения магнитного потока (Φ), не рекомендуется включать ток в катушке тумблером на панели источника питания, особенно при наличии в ней сердечника. Объясните, почему это так.

2.4. Повторить измерения в тех же точках при наличии железного сердечника внутри катушки. Данные измерений занести в табл. I.

Таблица I

№	$I(X, N)$					$N_1 = 3600$ витков					$\Phi, \text{Вб}$	$\Delta\Phi, \text{Вб}$	$\frac{\Delta\Phi}{\Phi}, \%$	$B, \text{Тл}$	$\Delta B, \text{Тл}$	$\frac{\Delta B}{B}, \%$			
	$X_{\text{см}} (I, N)$	$n, \text{м} \cdot 10^{-3}$					$\bar{n}, \text{м} \cdot 10^{-3}$	$\Phi, \text{Вб}$	$\Delta\Phi, \text{Вб}$	$\frac{\Delta\Phi}{\Phi}, \%$							$B, \text{Тл}$	$\Delta B, \text{Тл}$	$\frac{\Delta B}{B}, \%$
		1	2	3	4	5													
Без сердечника																			
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
С сердечником																			

Внимание! Переключить диапазон измерения гальванометра на предел $\times 10$

1																
2																
3																
4																
5																

Построить графики зависимостей $\Phi(X)$ и $B(X)$. Оценить погрешность для одного из X в обоих случаях (без сердечника и с сердечником) в зависимости от варианта.

3. Исследовать зависимость потока Φ индукции магнитного поля в данной точке от силы тока I в катушке:

а) без железного сердечника;

б) с железным сердечником в катушке K_1 (см. пп. 2.1 - 2.3). Данные измерений занести в таблицу.

Измерения п.3 и все последующие проводить в соответствии с методикой, описанной в п.2.

Построить графики зависимостей $\Phi(I)$ и $B(I)$. Оценить погрешность для одного из токов в обоих случаях (без сердечника и с сердечником).

4. Исследовать зависимость потока Φ и индукции B магнитного поля от числа витков N катушки K_1 без железного сердечника и с сердечником при $I = \text{const}$ и $X = \text{const}$.

Данные измерений занести в таблицу.

Внимание! При переключении витков катушки внимательно следить за постоянством тока.

Построить графики зависимостей $\Phi(N)$ и $B(N)$. Оценить погрешность для одного из X в обоих случаях (без сердечника и с сердечником) в зависимости от варианта.

5. Собрать схему рис. I.4, т.е. включить последовательно катушки K_1 и K_2 на максимальное число витков - 3600 (клеммы А и В).

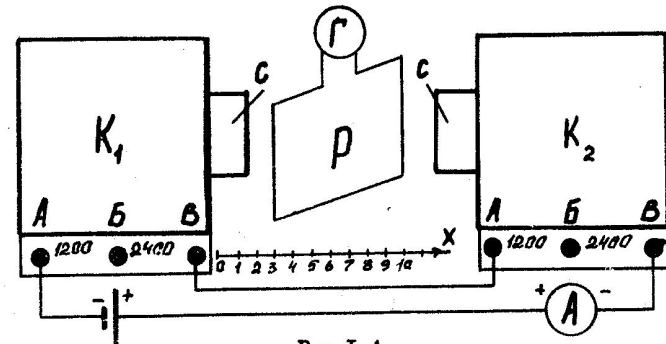


Рис. I.4

Исследовать зависимость потока Φ и индукции магнитного поля в зазоре от силы тока I при фиксированной величине зазора X (см. таблицу на рабочем месте):

а) без железного сердечника;

б) с железным сердечником в катушках.

Данные измерений занести в таблицу.

Построить графики зависимостей $\Phi(I)$ и $B(I)$. Оценить погрешность для одного из токов в обоих случаях в зависимости от варианта.

6. Собрать схему для случая встречного включения катушек (рис. I.5). Для этого достаточно поменять местами провода на клеммах одной из катушек.

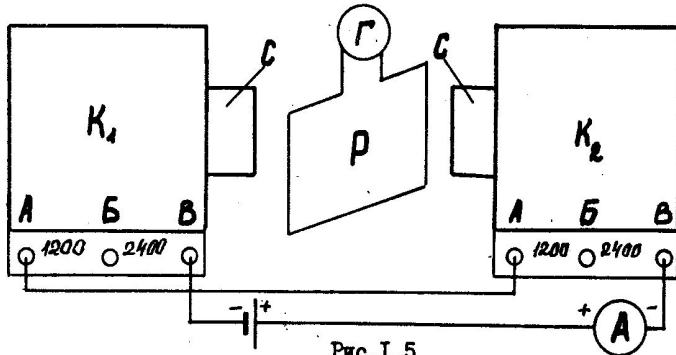


Рис. I.5

Исследовать зависимость потока и индукции магнитного поля в зазоре от силы тока I при фиксированной величине зазора X для случая встречного включения катушек. Данные измерений занести в таблицу.

Построить графики зависимостей $\Phi(I)$ и $B(I)$. Оценить погрешность для одного из токов в обоих случаях в зависимости от варианта.

7. Собрать схему последовательного включения двух катушек (рис. I.4). Исследовать зависимость потока и индукции магнитного поля в зазоре между катушками от ширины зазора при фиксированном значении силы тока в катушках для случаев с сердечниками и без них. Данные измерений занести в таблицу.

Построить графики зависимостей $\Phi(X)$ и $B(X)$. Оценить погрешность для одного из X в обоих случаях в зависимости от варианта.

8. Собрать схему для случая встречного включения катушек (рис. I.5) и исследовать зависимость потока и индукции магнитного поля в зазоре между катушками от ширины зазора при фиксированном значении силы тока в катушках для случаев с сердечниками и без них. Данные измерений занести в таблицу.

Построить графики зависимостей $\Phi(X)$ и $B(X)$. Оценить погрешность для одного из X в обоих случаях в зависимости от варианта.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

(по варианту, указанному преподавателем)

Указание. Индуктивности катушек рассчитать по формуле для длинного соленоида. Все необходимые для расчета данные взять из лабораторной работы.

1. Вывести закон изменения во времени тока в катушке K_1 при включении цепи. Определить силу тока в цепи в момент времени $0,1c$ после включения и работу источника за это время.

2. Вычислить заряд, который прошел бы по рамке, если ее переместить из точки, лежащей на оси катушки на расстоянии 3 см от ее края, на бесконечность при токе в катушке 0,3A.

3. Вычислить работу по перемещению рамки вдоль оси катушки из положения $l_1 = 3$ см от ее края в положение $l_2 = 6$ см, полагая ток в рамке равным 0,01A. Ток в катушке 0,5A.

4. Предложите метод проверки принципа суперпозиции полей с помощью приборов данной установки и экспериментально проверьте его.

5. Вычислить индукцию магнитного поля в центре рамки при силе тока в ней 0,1A.

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитная индукция? В каких единицах она измеряется?
2. Что такое магнитный поток? В каких единицах он измеряется?
3. Физический смысл магнитного потока.
4. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
5. Сформулируйте закон Фарадея. Правило Ленца.
6. В чем заключается метод измерения магнитного потока и магнитной индукции?
7. Какими способами можно изменить магнитный поток, пронизывающий рамку?
8. Будут ли одинаковыми отбросы гальванометра в следующих случаях:
 - a) рамка вынимается из зазора магнитопровода;
 - б) выключается ток в обмотке электромагнита.
9. Каковы отличительные особенности приборов магнитовольтовой и электромагнитной системы?
10. Что такое баллистическая постоянная гальванометра?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ДВУХ КОНТУРОВ ^X

Цель работы

Целью работы является определение коэффициента взаимной индукции двух контуров (катушек) в зависимости от расстояния между ними.

Подготовка к работе

При подготовке к лабораторной работе следует изучить теоретический материал по [3, с.178-199; 4, с.181-199; 5, с.249-282].

Известно, что существуют два частных случая электромагнитной индукции: явление самоиндукции и явление взаимной индукции.

Учтите, что явление электромагнитной индукции наблюдается во всех случаях, когда изменяется магнитный поток, пронизывающий контур. Так как электрический ток I , текущий в любом контуре, создает пронизывающий контур магнитный поток, то при изменении I изменится также и потокоцепление Ψ , вследствие чего в контуре индуцируется ЭДС. Это явление называется самоиндукцией, а дополнительные потоки, вызываемые ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_s , - экстратоками самоиндукции I_s .

Обратите внимание, что в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа магнитная индукция \vec{B} пропорциональна силе тока I , вызвавшего поле. Отсюда вытекает, что ток I в контуре и создаваемый им полный магнитный поток Ψ через контур пропорциональны друг другу:

$$\Psi = L \cdot I. \quad (I)$$

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью контура. Индуктивность контура численно равна магнитному потоку через этот контур при силе тока в контуре, равной единице (статическое определение индуктивности контура). Индуктивность измеряется в Генри (Гн). За единицу индуктивности принимают индук-

^X Здесь под словом "контур" следует понимать замкнутый проводник произвольной формы, ограничивающей часть пространства. Не следует путать понятие "контур" с колебательным контуром - основным радиотехническим узлом, содержащим катушку индуктивности L , конденсатор C и сопротивление R , в котором могут возбуждаться электрические колебания.

тивность такого контура, в котором при силе тока I_A возникает магнитный поток I_B

$$I_B = \frac{I_B \delta}{I_A}$$

Применив к явлению самоиндукции основной закон электромагнитной индукции $\mathcal{E}_s = -d\Psi/dt$, можно получить следующее выражение для ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}, \quad (2)$$

где L - индуктивность контура, dI/dt - скорость изменения тока в контуре.

На основании формулы (2) дайте другое (динамическое) определение индуктивности: индуктивность численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре, при скорости изменения тока в этом контуре, равной единице.

Заметьте, что формула (2) верна только при отсутствии ферромагнетиков (ферромагнетики - вещества, способные обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. Более подробно об этом см.: Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1982. Т.2. §59. В противном случае

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -\left(L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt}\right).$$

Последний член в написанном равенстве учитывает изменение индуктивности при изменении силы тока.

Обратите внимание, что магнитный поток через контур может быть создан током, текущим в другом контуре. Для этого рассмотрите два контура 1 и 2, расположенных близко друг к другу (рис.2.1).

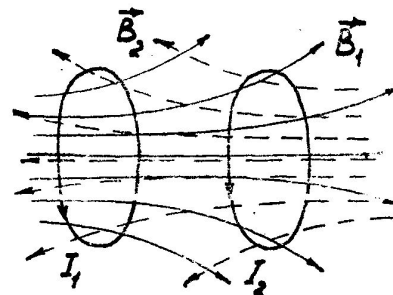


Рис.2.1

Если в контуре 1 течет ток I_1 , то полный магнитный поток Ψ_2 через контур 2, создаваемый током I_1 , будет пропорционален I_1 .

$$\Psi_2 = M_{21} \cdot I_1. \quad (3)$$

Поле, создающее этот поток, изображено на рис.2.1 штриховыми линиями. Если ферромагнетики вблизи контуров отсутствуют, то при изменении тока I_1 в контуре 2 ин-

дуцируется ЭДС

$$\mathcal{E}_{12} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (4)$$

Аналогично, при протекании в контуре 2 тока силы I_2 возникает сцепленный с контуром I поток

$$\Psi_1 = M_{12} I_2 \quad (5)$$

(поле, создающее этот поток, изображено пунктирными линиями).

При изменении тока I_2 в контуре I индуцируется ЭДС

$$\mathcal{E}_{11} = -M_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (6)$$

Контур I и 2 называются связанными, а явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменении силы тока в другом называется взаимной индукцией. Коэффициенты пропорциональности M_{12} и M_{21} называются взаимной индуктивностью контуров.

Рассмотрите работу перемещения каждого из контуров на бесконечность в поле, созданном током другого контура, и докажите, что в отсутствии ферромагнетиков $M_{21} = M_{12} = M$, где M — коэффициент взаимной индукции двух контуров (взаимная индуктивность) (см., например [3, с. 231-232]).

Заметьте, что величина M зависит от формы, размеров и взаимного расположения контуров. Однако если среда ферромагнитна, то кроме названных факторов взаимная индуктивность контуров зависит еще от величины токов в них.

Введите коэффициент связи K , характеризующий магнитную связь между контурами:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (7)$$

где L_1 и L_2 — индуктивности первого и второго контуров, соответственно.

Методика выполнения работы

Одна катушка L_1 (условно называемая первой) подключается к гальванометру (рис.2.2), а через вторую L_2 идет ток от источника питания.

Если тумблером Т выключить ток, идущий через катушку L_2 , то конечное число потокосцеплений в катушке L_1 (Ψ_1) станет равным нулю. В этом случае изменение числа потокосцеплений с первым контуром равно будет

$$\Delta \Psi_1 = \Psi_1$$

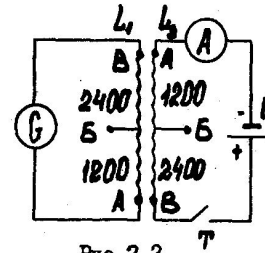


Рис.2.2

Количество электричества, наведенное в контуре L_1 с сопротивлением R при изменении в нем магнитного потока, равно

$$q = \frac{\Psi_1 - \Psi_1'}{R} = \frac{\Delta \Psi_1}{R}, \text{ где } \Psi_1 \text{ и } \Psi_1' \text{ — соответственно начальное и конечное значения числа потокосцеплений. В нашем случае } \Psi_1' = 0$$

$$\text{и } q = \frac{\Psi_1}{R} = \frac{M I_2}{R} \quad (8)$$

Гальванометр представляет собой магнитоэлектрический прибор с подвижной частью (рамкой) на растяжках. Принцип действия гальванометра подробно описан в работе 4.1.

Кратковременный импульс тока, протекающий через рамку гальванометра, вызывает отброс светового "зайчика", пропорциональный величине q протекшего заряда

$$q = B_0 \cdot n, \quad (9)$$

где B_0 — баллистическая постоянная гальванометра, численно равная заряду, который вызывает отброс светового "зайчика" на одно деление шкалы; n — число делений по шкале гальванометра, равное первому отбросу светового зайчика".

После подстановки выражения (9) в (8) получаем

$$M = \frac{R \cdot B_0 \cdot n}{I_2} \quad (10)$$

Сопротивление цепи контура R складывается из сопротивления гальванометра R_g и сопротивления витков катушки L_1 : $R = R_g + R_1$. Величины R_g и R_1 даны на рабочем месте. I_2 — сила тока во второй катушке.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Первая и вторая части работы выполняются в зависимости от варианта, заданного преподавателем. Третья часть (табл. III) выполняется для всех вариантов.

I. Собрать схему рис.2.2. При этом в качестве катушки L_2 следует использовать катушку с двумя выводами, которая может свободно перемещаться по направляющим ползьям. В качестве L_1 используется часть обмотки жестко фиксированной катушки с выводами А, Б, В. Число витков (N_1) катушки L_1 , которое необходимо использовать, выбирается в соответствии с вариантом задания.

№ вариант	Число витков первой катушки	Табл. I.	Табл. II.	Табл. III.	Дополнител. задан.
		ток во второй катушке I_2 (А)	расстояние между катушками X (см)		
1	1200 (А-В)	0,006	0	X = 0	1,2
2	2400 (Б-В)	0,005	1		2,3
3	3600 (А-В)	0,004	2	$I_2=0,005A$	3,1

- При необходимости корректором вывести стрелку миллиамперметра на нулевую отметку шкалы.
- Проверить схему у дежурного лаборанта, а затем включить источник питания и гальванометр.
- Установить силу тока во второй катушке по миллиамперметру потенциометром на источнике питания согласно варианту.
- Выключить ток I_2 , разомкнув цепь второй катушки тумблером Γ , и заметить отброс "зайчика" гальванометра.
- Произвести измерения по пять раз при шести расстояниях X между катушками. Данные измерений занести в табл. I. Найти средний отброс "зайчика" гальванометра. Рассчитать M и K. Рассчитать погрешность определения M и K для I-го измерения. Результаты занести в табл. I. Построить графики зависимостей M(X) и K(X).
- При заданном в зависимости от варианта расстоянии между катушками измерить отброс "зайчика" гальванометра в зависимости от силы тока I_2 . Найти среднее значение \bar{n} . Данные занести в табл. II.

Таблица I, II

№	X, см (I, A)	$n (M \cdot 10^3)$					$\bar{n},$ $\frac{M \cdot 10^3}{n}$	M, Гн	$\Delta M,$ Гн	$\frac{\Delta M}{M}$ %	K	ΔK	$\frac{\Delta K}{K}$ %
		N_1											
		1	2	3	4	5							
1													
2													
...													

- Рассчитать M и K. Рассчитать погрешность определения M и K для 6-го измерения. Результаты занести в табл. II. Построить графики зависимостей M (I_2) и K (I_2).
- При заданном расстоянии между катушками X = 0 см и силе тока во второй катушке $I_2 = 0,005A$ измерить отброс "зайчика" в зави-

симости от количества витков в первой катушке. Данные измерений занести в табл. III.

Таблица III

№	N_1	X =					$I_2 =$					K	ΔK	$\frac{\Delta K}{K}$ %
		$n (M \cdot 10^3)$					$\bar{n},$ $\frac{M \cdot 10^3}{n}$	M, Гн	$\Delta M,$ Гн	$\frac{\Delta M}{M}$ %				
		1	2	3	4	5								
1	1200													
2	2400													
3	3600													

Рассчитать M и K и погрешности их определения. Результаты занести в табл. III. Построить графики зависимостей M (N_1) и K (N_1). Для всех расчетов величины L_1 и R_1 в зависимости от количества витков катушки, а также L_2 даны на рабочем месте.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Указание. Индуктивности катушек рассчитать по формуле для длинного соленоида. Все необходимые для расчета данные взять из лабораторной работы.

- Вычислите взаимную энергию двух контуров, полагая $I_1=0,005A$. $I_2=0,004A$. Расстояние между катушками X = 0.

- Считая индуктивности двух обмоток катушки K_1 соответственно равными $L_1=0,05$ Гн и $L_2=0,07$ Гн, определите взаимную индуктивность. Рассеяния магнитного поля нет.

- На длинный цилиндр намотаны вплотную две обмотки I - I и 2 - 2 так, как показано на рис. 2.3. Индуктивность каждой обмотки равна 0,05 Гн. Чему будет равна индуктивность L всей цепи, если: 1) концы 1 и 2 соединить, а в цепь включить концы I и 2; 2) концы I и 2 соединить, а в цепь включить концы I и 2; 3) концы I и 2 и I и 2 соединить и обе пары концов включить в цепь?

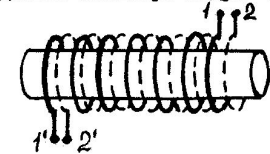


Рис. 2.3

Контрольные вопросы

- В чем заключается явление самоиндукции?
- Дайте статическое и динамическое определение индуктивности.
- В чем заключается явление взаимной индукции? Чему равна ЭДС взаимной индукции?

4. Дайте статическое и динамическое определение взаимной индукции.

5. В каких единицах измеряется индуктивность и взаимная индуктивность? Дайте определение этих единиц измерения.

6. В каком случае взаимная индуктивность зависит от тока, протекающего по контурам?

7. Может ли M быть больше L ? Почему?

8. Каково максимальное значение коэффициента связи?

9. Найдите взаимную индуктивность двух катушек, намотанных одна поверх другой.

Лабораторная работа 4.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

Цель работы

Цель лабораторной работы состоит в экспериментальном определении среднего по сечению соленоида значения магнитного поля и сравнении полученных результатов с теоретическими.

Подготовка к работе

При подготовке к лабораторной работе следует изучить теоретический материал по [3, гл. VII-IX; 4, гл. VII-VIII; 5, гл. VII, IX].

Приведите экспериментальные факты, подтверждающие возникновение силового магнитного поля в пространстве, где имеются движущиеся электрические заряды (электрический ток). Обратите внимание, что основное свойство этого поля заключается в том, что на проводники с током, находящиеся в нем, действуют силы. Способность магнитного поля вызывать появление механической силы, действующей на какой-либо элемент тока $I d\vec{l}$, где I - сила тока, а $d\vec{l}$ - вектор, имеющий длину отрезка dl и направленный вдоль тока, можно количественно описать, задавая в каждой точке поля некоторый вектор \vec{B} . При этом сила, действующая на элемент тока $I d\vec{l}$, равна

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \vec{B}]. \quad (1)$$

Величина \vec{B} называется вектором магнитной индукции и является основной векторной характеристикой магнитного поля. Направление вектора \vec{B} совпадает с направлением, указываемым северным концом магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля.

Заметьте, что полную силу, действующую на проводник конечных размеров, можно найти, суммируя силы на отдельных его элементах. Если

ли имеется прямолинейный отрезок провода и магнитная индукция во всех его точках постоянна, то есть поле однородно, то из формулы (1) имеем

$$\vec{F} = I [\vec{l} \vec{B}] \quad (2)$$

или

$$F = I l B \sin(\vec{l}, \vec{B}). \quad (2a)$$

Здесь \vec{B} - индукция магнитного поля, определяемая как физическая величина, численно равная силе, действующей со стороны однородного поля на единицу длины перпендикулярного к вектору \vec{B} прямолинейного проводника, по которому течет ток единичной силы.

Вспомните, что в системе СИ за единицу измерения индукции магнитного поля Тесла (Тл) принята индукция такого однородного магнитного поля, в котором на 1 м длины перпендикулярного к вектору магнитной индукции прямого проводника с током 1 А действует сила 1 Н.

Сформулируйте принцип суперпозиции магнитного поля в следующем виде: если имеется несколько контуров с током, каждый из которых создает поле с магнитной индукцией соответственно \vec{B}_1, \vec{B}_2 и т.д., то магнитная индукция результирующего поля равна векторной сумме индукции отдельных контуров:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots = \sum_i \vec{B}_i. \quad (3)$$

Введите вектор напряженности магнитного поля \vec{H} , связанный с вектором \vec{B} соотношением

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu \mu_0}. \quad (4)$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная, μ - магнитная проницаемость среды, физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

Покажите, что циркуляция вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру \vec{l} равна алгебраической сумме токов, охватываемых контуром

$$\oint \vec{H}_e d\vec{l} = \sum_i I_i. \quad (5)$$

Здесь H_e - проекция \vec{H} на направление элемента контура интегрирования $d\vec{l}$, n - число проводников с током I_i , охватываемых контуром.

Пользуясь теоремой о циркуляции напряженности магнитного поля (5) и связью между векторами \vec{B} и \vec{H} (4), покажите, что индукция магнитного поля на оси бесконечно длинного соленоида равна

$$B = \mu_0 n I, \quad (6)$$

где n_0 - число витков, приходящихся на l и длины соленоида ($n_0 = \frac{N}{l}$); N - число витков на длине l , а I - сила тока, протекающего по виткам соленоида.

Особое внимание обратите на то, что индукция магнитного поля соленоида конечной длины на его оси определяется по формуле

$$B = \frac{\mu_0 n_0 I}{2} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (7)$$

где α_1 и α_2 - углы, образованные радиусами-векторами, проведенными к концам соленоида, с положительным направлением оси (рис.3.1)

$$\cos \alpha_1 = -\frac{l_1}{\sqrt{r^2 + l_1^2}}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{l_2}{\sqrt{r^2 + l_2^2}}, \quad (8)$$

где за положительное направление оси принимается направление вектора индукции магнитного поля \vec{B} , которое может быть определено по правилу буравчика.

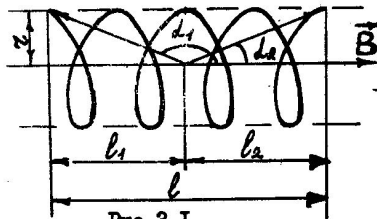


Рис.3.1

Если точка на оси находится вне соленоида слева, то оба угла будут острыми $\cos \alpha_1 > \cos \alpha_2$, (рис.3.2).

Если же точка на оси находится справа от соленоида, то, как легко убедиться, $\cos \alpha_1$ и $\cos \alpha_2$ будут отрицательными, а по абсолютному значению $|\cos \alpha_1| > |\cos \alpha_2|$. Таким образом, во всех точках ось индукция магнитного поля имеет одно и то же направление.

При увеличении длины соленоида ($l \gg r$) для его средней части формула (7) переходит в (6), так как углы α_1 и α_2 при этом стремятся к 180° и 0° соответственно.

Заметьте, что магнитные поля, так же как и электрические, можно изобразить графически при помощи линий индукции, таких линий,

касательная к которым в каждой точке совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля в той же точке. Если величина и направление вектора магнитной индукции не меняются от точки к точке (поле однородно), то линии индукции должны идти на равном расстоянии параллельно друг другу. Линии индукции магнитного поля прочерчивают с такой густотой, чтобы число линий, пересекающих единицу поверхности, перпендикулярной к ним, было равно (или пропорционально) величине индукции магнитного поля в данном месте.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Среднее по сечению соленоида значение индукции магнитного поля с достаточной для практики точностью может быть определено, если известна величина магнитного потока Φ . Магнитным потоком или потоком вектора магнитной индукции называют величину, равную

$$\Phi = \int B_n dS, \quad (9)$$

где $B_n = B \cos \alpha$. Здесь α - угол между направлением нормали к площадке dS и направлением индукции \vec{B} , B_n - проекция вектора \vec{B} на нормаль \vec{n} . Так как B_n - скаляр, равный числу линий магнитной индукции, проходящих через единицу поверхности рассматриваемой площадки, то магнитный поток есть скалярная величина, определяющая полное число линий магнитной индукции, пронизывающих данную площадку.

Очевидно, что если поверхность S плоская и перпендикулярна линиям индукции, то

$$\Phi = B \cdot S. \quad (10)$$

Если в (9) и (10) выразить B в Тл, а S - в m^2 , то магнитный поток окажется выраженным в веберах (Вб). Таким образом, для соленоида из (10)

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (11)$$

где S - площадь сечения соленоида, выраженная в m^2 .

Если контур состоит не из одного, а из N витков, то полный магнитный ток через такой контур (число потоко-сплетений),

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i, \quad (12)$$

где Φ_i - поток, сплетенный с одним витком.

В частном случае, когда $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \dots = \Phi$, т.е. / поток

магнитной индукции через все витки одинаков,

$$\Phi = N\Phi_1 \quad (12)$$

При изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную проводящим контуром, в последнем возникает электродвижущая сила индукции \mathcal{E}_i . Если же проводящий контур замкнутый, то под действием этой ЭДС индукции возникает индукционный ток. Это явление носит название электромагнитной индукции.

Величина \mathcal{E}_i не зависит от способа, которым осуществляется изменение полного магнитного потока Ψ , и определяется лишь скоростью изменения Ψ . Закон Фарадея для электромагнитной индукции записывается в виде

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (14)$$

Знак "-" в формуле (14) является математическим выражением правила Ленца, согласно которому ток всегда направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать причине, его вызывающей.

Величина индукционного тока в контуре может быть определена по закону Ома $I_i = \mathcal{E}_i/R$. Этот ток за время dt переносит заряд

$$dq = I_i dt = \frac{\mathcal{E}_i}{R} dt = - \frac{d\Psi}{R} = -N \frac{d\Phi}{R}$$

Производя интегрирование, получим формулу для расчета заряда q , который протекает по контуру с сопротивлением R при изменении потока, сцепленного с контуром от Ψ_1 до Ψ_2 :

$$q = \frac{\Psi_1 - \Psi_2}{R} = N \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} = -N \frac{\Delta\Phi}{R} \quad (15)$$

Если $\Delta\Phi = \Phi$ (т.е. $\Phi_1 = 0$ или $\Phi_2 = 0$), то этот поток можно определить, зная протекший заряд q и параметры контура N и R .

Измерение магнитного потока производится баллистическим методом с помощью катушки L_2 , расположенной соосно на соленоиде и замкнутой на гальванометр. Схема установки приведена на рис.3.3.

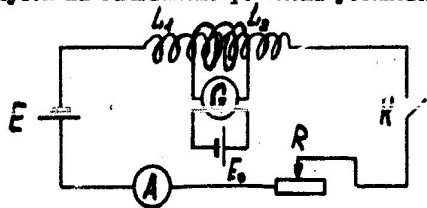


Рис.3.3

- L_1 - соленоид
- L_2 - измерительная катушка
- R - реостат
- K - ключ
- E - источник питания
- A - амперметр
- G - гальванометр
- \mathcal{E}_2 - его питание

Как было показано выше, величина магнитного потока, если использовать обозначение рис.3.3, равна

$$\Phi = \frac{qR_2}{N_2} \quad (16)$$

где q - заряд, протекший через контур L_2 , число витков которого N_2 , а его сопротивление $R_2 = R_2' + R_2$, величины R_2 и R_2' даны на рабочем месте.

Кратковременный импульс тока, возникающий в цепи гальванометра при размыкании ключа K , отключающего питания соленоида, вызывает отброс светового "зайчика" гальванометра, пропорциональный величине протекающего заряда:

$$q = B_0 \cdot n \quad (17)$$

где B_0 - баллистическая постоянная гальванометра, численно равная заряду, который вызывает отброс светового "зайчика" на одно деление шкалы; n - расстояние в метрах по шкале, равное первому отбросу светового "зайчика".

Подставляя (16) и (17) в (15), получим окончательную формулу для определения индукции поля соленоида

$$B = \frac{B_0 \cdot n \cdot R_2}{N_2 \cdot S} \quad (18)$$

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Собрать схему, показанную на рис.3.3. Цепь гальванометра собрана.
2. Установить вторичную катушку L_2 посередине соленоида. Вывести стрелку амперметра корректором на нулевую отметку шкалы. Включить нужный предел шкалы (1 или 2А) в зависимости от величины рабочего тока I установкой перемычки в соответствующее гнездо. Замкнуть ключ K и с помощью реостата R выставить требуемый ток (величины силы тока указаны на рабочем месте).
3. Подобрать у гальванометра необходимый предел измерения. Начать с самого грубого "x100", на котором отброс "зайчика" будет минимальным и невыходящим за пределы шкалы. Вывести световой указатель на нулевую отметку шкалы, регулируя его положение: по вертикали - поворотом наружного зеркала (не касаясь руками его рабочей поверхности), по горизонтали - поворотом корректора.

Установить "зайчик" на шкале таким образом, чтобы его нижний край касался чисел отсчета.

Разомкнуть ключ К и записать величину первого отброса гальванометра. Прodelать те же измерения при замыкании ключа (перед каждым измерением нужно проверить нулевое положение указателя и при необходимости отрегулировать его с помощью корректора).

Полученные результаты усреднить. В средней части соленоида катушку L_2 следует перемещать через 4 см, на край и вне соленоида — через 2 см.

4. Прodelать указанное в п.2 и 3 при другом значении тока и результаты занести в табл. I.

Таблица I

№ пп.	I, A									\bar{n}	$\Delta \bar{n}$	$B_{\text{эк}}, \text{cos} \alpha_1, \text{cos} \alpha_2$	$B_{\text{теор}}$	
	X	$n, \text{мм}$												
		1			2			3						
см	разом	зам	ср	разом	зам	ср	разом	зам	ср	мм	мм	T_n	T_n	
0														
4														
...														
20														

5. Для каждого положения вторичной катушки рассчитать индукцию магнитного поля B по формуле (I8).

6. Рассчитать индукцию магнитного поля для тех же точек по теоретическим формулам (7) и (8). В средней части соленоида расчет можно вести по формуле (II). Для двух точек до конца витков соленоида на его концы и двух точек за пределами витков расчет вести по формуле (7).

7. Построить графики зависимости измеренного значения $B_{\text{эк}}$ и теоретического значения $B_{\text{теор}}$ от расстояния X от центра соленоида.

8. Для значений $X = 0; 14; 18$ см вычислить относительную и абсолютную погрешности, пользуясь формулами (I8) и (8).

В каких из этих трех точек относительная ошибка наибольшая и чем это определяется?

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Измерительную катушку, расположенную в средней части соленоида,

подключили к источнику тока. Считая установившееся значение силы тока в ней 4А, определить:

1. Величину потока магнитной индукции, сцепленного с соленоидом
2. ЭДС, возникающую в соленоиде при равномерном изменении тока от 4А до 2А в течение 1 с.
3. Заряд, проходящий по замкнутому накоротко соленоиду, при выключении тока в катушке.

Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля?
Дайте определение на основании: а) закона Ампера, б) силы Лоренца, в) механического вращающего момента, действующего на контур с током в магнитном поле.
2. Что называется магнитным моментом контура с током? Как определяется направление нормали к контуру?
3. В чем заключается принцип суперпозиции магнитных полей?
4. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. Каков физический смысл магнитной проницаемости?
5. Напишите выражения для индукции магнитного поля в центре кругового тока и в точке, отстоящей от прямого проводника на расстоянии l .
6. Что называется напряженностью магнитного поля?
7. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора напряженности магнитного поля.
8. По какой формуле находится индукция:
а) на оси бесконечно длинного соленоида;
б) соленоида конечной длины.
9. Каковы будут углы α_1 и α_2 для точек на концах соленоида?
10. Почему у концов соленоида индукция магнитного поля меньше, чем в средней его части?
II. Каково магнитное поле вне бесконечно длинного соленоида?
12. Что называется силовой линией магнитного поля? Чем определяется густота, с которой проводятся силовые линии магнитного поля?
13. Что называется потоком вектора магнитной индукции? Каков его физический смысл?
14. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Сформулируйте закон Фарадея, правило Ленца.

Лабораторная работа 4.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы

Целью данной работы является ознакомление с устройством и принципом действия тангенс-гальванометра, измерение с его помощью горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли и использование тангенс-гальванометра для определения чувствительности миллиамперметра с непроградуированной шкалой.

ПЛАН ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

При подготовке к лабораторной работе следует изучить теоретический материал по [3, гл.8; 4, гл.6; 5, гл.7].

Обратите внимание, что магнитное поле Земли подобно полю пара с осью, направленной приблизительно с севера на юг (рис.4.1). Все магнитные силовые линии сходятся

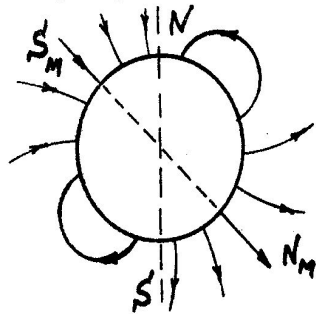
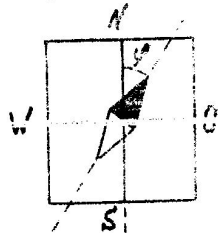
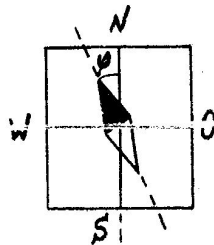


Рис.4.1

в двух точках, проекция которых на поверхность Земли называется магнитными полюсами Земли N_M и S_M . Их положение меняется с течением времени. Заметьте, что магнитные полюса не совпадают с географическими и магнитная стрелка отклонена от географического меридиана на угол, который называют магнитным склонением φ . Магнитное склонение называют западным или восточным в зависимости от того, к западу или востоку от плоскости географического меридиана отклоняется северный полюс магнитной стрелки. Принято восточное склонение отмечать знаком "+", а западное - знаком "-".



а)



б)

Рис.4.2

На рис.4.2 изображено положение магнитной стрелки относительно стран света: а) в местах с восточным магнитным склонением, б) с западным (например в Ленинграде). Величина склонения φ может меняться в диапазоне от 0° до 180° .

Учтите, что вектор напряженности магнитного поля Земли не горизонтален в данной ее точке, а образует с горизонтом некоторый угол, который называется магнитным наклоном i (рис.4.3). На магнитном экваторе наклонение равно нулю.

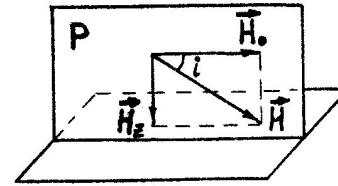


Рис.4.3

Вертикальная плоскость P , в которой расположится магнитная стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана данного места, линия ее пересечения с поверхностью Земли - магнитным меридианом. Лежащий в плоскости P магнитного меридиана вектор напряженности земного магнитного поля H можно разложить на две составляющие: горизонтальную H_0 и вертикальную H_z (рис.4.3).

Очевидно, что

$$|H| = H = \frac{H_0}{\cos i}; \quad H_z = H_0 \operatorname{ctg} i. \quad (1)$$

Обратите внимание на то, что величину напряженности земного магнитного поля в том или ином месте Земли чаще всего характеризуют величиной ее горизонтальной составляющей H_0 , так как ее можно легко измерить.

Сделайте вывод, что три величины: φ , i и H_0 полностью определяют величину и направление магнитного поля Земли в данном месте H . Эти три величины называют элементами земного магнитного поля. Они изменяются с течением времени вследствие движения магнитных полюсов.

МЕТОДИКА РАБОТЫ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТАНГЕНС-ГАЛЬВАНОМЕТРА

Существование магнитного поля в любой точке Земли можно обнаружить с помощью магнитной стрелки: если подвесить ее так, чтобы точка подвеса совпала с центром тяжести стрелки, то она установится по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли.

В данной работе для нахождения величины горизонтальной составляющей напряженности (H_0) используется тангенс-гальванометр, который представляет собой круговой проводник радиуса z , состоящий из n витков провода, намотанных плотно друг к другу, в центре которого находится магнитная стрелка. Она может вращаться лишь вокруг вертикальной оси, следовательно, стрелка будет устанавливаться под действием горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли H_0 в плоскости магнитного меридиана (рис.4.4,а). Эту систему называют тангенс-гальванометром.

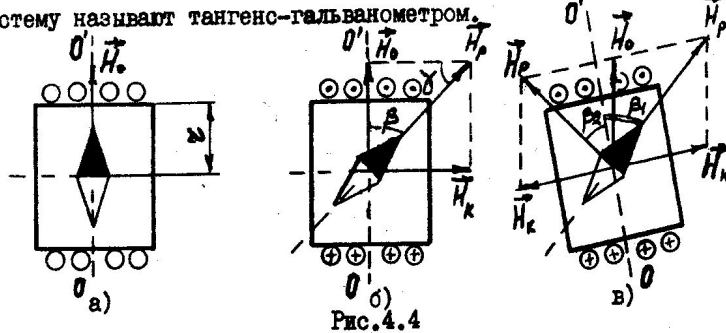


Рис.4.4

На рис.4.4 показано сечение катушки горизонтальной плоскостью для случаев: а) ток отсутствует, б,в) - ток включен.

При пропускании по катушке тока I возникает магнитное поле кругового тока с напряженностью H_k , направленной перпендикулярно к плоскости катушки. Если витки катушки расположить в плоскости магнитного меридиана, то на стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока (рис.4.4,б). В результате стрелка установится по направлению равнодействующей H_p . Из рис.4.4,б видно, что

$$H_k = H_0 \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (2)$$

Но катушка тангенс-гальванометра устанавливается в направлении север-юг, т.е. в плоскости магнитного меридиана, не совсем точно (рис.4.4,в). Следовательно, H_k не будет перпендикулярен H_0 и тогда углы отклонения стрелки вправо (β_1) и влево (β_2) от начального положения, соответствующие двум противоположным направлениям тока в катушке, не будут равны. Поэтому в качестве β нужно подставлять в формулу (2) среднее значение

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}. \quad (3)$$

С другой стороны, величину напряженности магнитного поля в центре катушки тангенс-гальванометра H_k можно найти из закона Био-Савара-Лапласа (см. например, [4, § 47]):

$$H_k = \frac{I \cdot n}{2z}, \quad (4)$$

где I - величина постоянного тока, текущего по катушке,
 z - радиус катушки,
 n - число витков.

Итак, сравнивая формулы (2) и (4), можно написать:

$$\frac{I \cdot n}{2z} = H_0 \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad \text{откуда} \quad H_0 = \frac{I \cdot n}{2z \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (5)$$

Для данного местоположения прибора на Земле и определенного типа прибора величина

$$C = \frac{I}{\operatorname{tg} \beta} \quad (6)$$

является постоянной и называется постоянной тангенс-гальванометра.

Тогда

$$H_0 = C \cdot \frac{n}{2z}. \quad (7)$$

Формулу (5) можно переписать в виде

$$I = C \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (8)$$

Отсюда следует, что постоянная C численно равна току, который протекает по виткам, при угле отклонения стрелки $\beta = 45^\circ$. Для того чтобы найти H_0 , можно написать следующие соотношения (см. рис.4.4,в):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{H_k}{\sin \beta_1} = \frac{H_0}{\sin \beta_2}; \quad \frac{H_k}{\sin \beta_2} = \frac{H_0}{\sin \beta_1}, \\ \beta_1 + \beta_2 + \gamma_1 + \gamma_2 = \pi. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Решение полученной системы уравнений (9) относительно имеет вид

$$H_0 = \frac{I \cdot n}{2z} \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sqrt{(\sin \beta_1)^2 + (\sin \beta_2)^2 - 2 \sin \beta_1 \sin \beta_2 \cos(\beta_1 + \beta_2)}}. \quad (10)$$

При $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ эта формула переходит в формулу (5).

Таким образом, круговой проводник с магнитной стрелкой в центре может быть использован для нахождения силы тока I , текущего по цепи, по градуированной кривой $I(\beta)$ прибора. Поэтому он и называется тангенс-гальванометром.

В данной работе с его помощью сначала определяется горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли H_0 .

Катушка используемого в работе тангенс-гальванометра укреплена на вращающейся подставке. Угол поворота магнитной стрелки определить по лимбу прибора. Так как формула (4) верна только для точки, находящейся в центре окружности, то магнитная стрелка взята малых размеров по сравнению с радиусом витков катушки.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Часть I. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли

I. Собрать электрическую схему (рис.4.5).

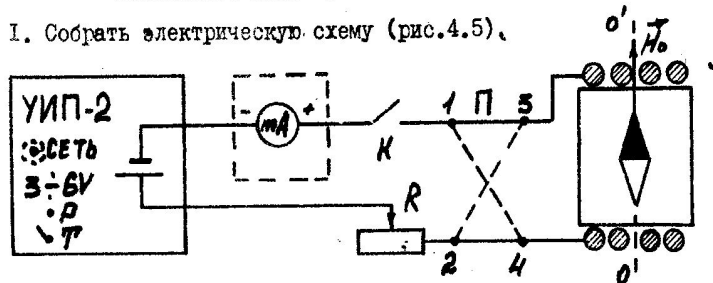


Рис.4.5

Питание схемы обеспечивается универсальным источником питания (УИП-2). Включить прибор и прогреть в течение 15 мин.

На схему через выходные клеммы "3 - 9 V" подается постоянное напряжение от 3 до 6В при токе нагрузки до 1А (при этом тумблер должен быть в левом положении). С помощью ручки регулировки напряжения P над тумблером T осуществляется изменение выходного напряжения от 3 до 6В.

2. Установить плоскость рамки катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана, вращая катушку до тех пор, пока магнитная стрелка окажется в плоскости витков. Зафиксировать рамку катушки в этом положении контрольным винтом. Повернуть лимб так, чтобы стрелка указывала на ноль.

3. Повернув ручки потенциометра R и регулировки напряжения P в крайнее левое положение, установить минимальную величину постоянного тока в витках, которая измеряется амперметром типа М 104. Для устранения погрешности от параллакса (т.е. от видимого изменения положения стрелки вследствие перемещения глаза наблюдателя) шкала снабжена зеркалом: при отсчете нужно добиться совпадения стрелки и ее зеркального отражения.

Произвести отсчет угла β_1 (отклонения стрелки вправо от начального положения). Перевести переключатель Π на панели тангенс-гальванометра, который изменяет направление тока в цепи катушки на противоположное, в другое положение и снова произвести отсчет угла β_2 (отклонения стрелки влево от начального положения), не изменяя ток I . Данные занести в табл. I.

Таблица I

	[] ^N	1	2	3
I		40	300
β_1	град					
β_2	град					
$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$	град					
$\tan \beta$	-					
$C = \frac{I}{\tan \beta}$	А					

4. Изменяя величину тока на ΔI в витках катушки потенциометром R и ручкой P во всем диапазоне от 40 до 300 мА, повторить измерения п.3.

5. Вычислить величину угла β . Рассчитать постоянную тангенс-гальванометра C и найти ее среднее значение \bar{C} .

6. По формуле (7) рассчитать H_0 . Определить абсолютную ΔH_0 и относительную δH_0 погрешности измерения H_0 .

7. Построить зависимости тока $I = f(\tan \beta)$ и $I = f(\beta)$. Зависимость тока от угла называется градуировочной кривой тангенс-гальванометра.

Часть II. Градуировка миллиамперметра

1. Собрать схему (рис.4.6): вместо прибора М 104 подключить миллиамперметр с неизвестной ценой деления.

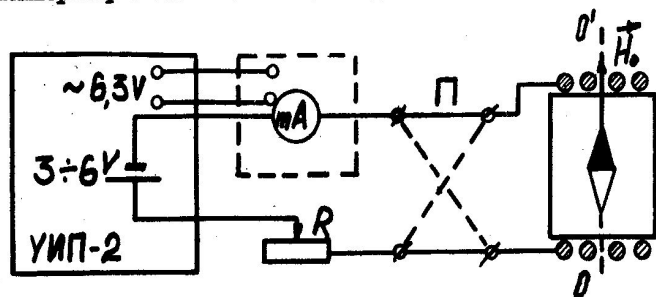


Рис.4.6

Если миллиамперметр с неизвестной шкалой требует установки в горизонтальное положение, то при помощи регулировочных ножек установить прибор по уровню (при этом пузырь должен быть в центре круга).

2. Включить источник питания. Потенциометром R и ручкой P выставить максимальное сопротивление в цепи. Корректором выставить указатель (стрелку или "зайчик") на первое деление шкалы миллиамперметра.

Затем перевести ручку потенциометра в крайнее правое положение (при этом сопротивление R - минимально, а ток I - максимален). Ручкой потенциометра P поддиапазона 3-6В на приборе УИП-2 выставить такое выходное напряжение, чтобы наблюдался отброс "зайчика" на всю шкалу миллиамперметра.

Выбранное положение ручки потенциометра P на источнике питания остается неизменным при дальнейших измерениях!

3. Потенциометром R установить стрелку миллиамперметра на первое деление шкалы.

4. Определить угол отклонения β_1 стрелки тангенс-гальванометра. Не меняя величины тока в витках, переключить Π (при этом изменяется направление тока) и снова произвести отсчет угла β_2 . Данные занести в табл.П.

5. Измерения п.4 повторить по всей шкале.

6. Вычислить β .

7. Используя величину C , полученную в I-й части работы, рассчитать по формуле (6) ток в цепи катушки тангенс-гальванометра.

8. Рассчитать чувствительность миллиамперметра по току S (т.е. величину тока, соответствующую одному делению его шкалы) по формуле

$$S = \frac{I}{K},$$

где K - число делений. Занести в табл.П.

9. Определить среднюю чувствительность миллиамперметра $\langle S \rangle$ и ее абсолютную ΔS и относительную δS погрешности.

Таблица П

	Деления	1	2
	[]			
β_1	град			
β_2	град			
$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$	град			
$\operatorname{tg} \beta$	-			
$I = C \cdot \operatorname{tg} \beta$	A			
$S = \frac{I}{K}$	A			

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Определите величину напряженности магнитного поля в центре тангенс-гальванометра для минимального и максимального значений тока по данным работы.

2. Тангенс-гальванометр сначала не был точно установлен в плоскости магнитного меридиана, поэтому при пропускании тока в одном направлении стрелка отклонилась на угол β_1 , а при пропускании тока в другом направлении - стрелка отклонилась в противоположном направлении на угол β_2 . Определить силу тока I , если постоянная тангенс-гальванометра C (C равна току, при котором стрелка отклоняется на 45°).

Контрольные вопросы

1. Как устанавливается магнитная стрелка в магнитном поле?
2. Как определяется направление H ?

3. Определить элементы земного магнетизма.
4. Чему равна напряженность магнитного поля в центре кругового тока?
5. Каков физический смысл постоянной C ?
6. Почему следует ориентировать катушку тангенс-гальванометра в направлении магнитного меридиана ?
7. При каком положении стрелки тангенс-гальванометра систематическая погрешность величины H_0 (δH_{00}) будет иметь минимальное значение ?

Лабораторная работа 4.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы

Целью данной работы является определение удельного заряда электрона (отношение заряда электрона к его массе).

Подготовка к работе

При подготовке к лабораторной работе следует изучить теоретический материал по следующим разделам: движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях [3 гл.17; 4 гл.10].

При подготовке к работе следует обратить внимание на особенности движения заряженных частиц в однородном электрическом и однородном магнитном полях.

Движение заряженной частицы в однородном электрическом поле описывается соотношением

$$m \frac{dV}{dt} = qE, \quad (1)$$

где m - масса частицы;

q - заряд частицы;

E - напряженность электрического поля;

$\frac{dV}{dt}$ - ускорение частицы.

Траекторией движения заряженной частицы в однородном электрическом поле будет являться парабола (сравните уравнение (1) с уравнением движения тела в поле тяжести Земли).

При движении заряженной частицы в однородном магнитном поле на нее будет действовать сила Лоренца

$$F_n = q \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где B - величина индукции магнитного поля, v - скорость заряженной частицы, α - угол между направлениями вектора индукции B и вектора скорости частицы v .

Сила Лоренца направлена перпендикулярно как к направлению вектора индукции магнитного поля, так и к направлению вектора скорости частицы. Обратите внимание, что работа силы Лоренца всегда равна нулю, следовательно, абсолютные значения скорости движения частицы, а значит и энергия частицы, остаются постоянными при движении. Сила Лоренца будет являться центростремительной силой.

Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле перпендикулярно к направлению вектора индукции ($v \perp B$), то из соотношения (2) получаем

$$F_n = q \cdot v \cdot B. \quad (3)$$

Так как эта сила является центростремительной силой, то получаем

$$\frac{mv^2}{R} = q \cdot v \cdot B, \quad (4)$$

где R - радиус окружности, по которой будет двигаться заряженная частица. Из соотношения (4) получаем

$$R = \frac{mv}{q \cdot B}. \quad (5)$$

Если скорость частицы составляет некоторый угол α с направлением магнитного поля, то движение заряженной частицы складывается из двух движений. Вдоль поля частица движется равномерно (так как на движение вдоль силовых линий магнитное поле не влияет). В направлении, перпендикулярном полю, частица движется по окружности. В результате сложения этих движений частица будет двигаться по спирали.

Описание лабораторной установки и метод измерений

В лабораторной работе используется двухэлектродная лампа. Анод выполнен в виде цилиндра, а катодом служит нить накала, проходящая по оси этого цилиндра. Лампа помещена внутри соленоида, который создает внешнее магнитное поле (рис.5.1).

Если в витках соленоида протекает ток I_c , а между катодом и анодом подать напряжение (U_a), то внутри анода образуются взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля. Такая геометрия полей близка к геометрии этих полей в магнетронах - генераторах электромагнитных колебаний в области сверхвысоких частот. На рис.5.2 изображены траектории движения электронов в плоскости, перпендикулярной катоду. При отсутствии магнитного поля ($I_c = 0$) электроны,

вылетающие из катода, практически без начальной скорости, двигались бы в электрическом поле вдоль силовых линий от катода к аноду (траектория 1 на рис.5.2).

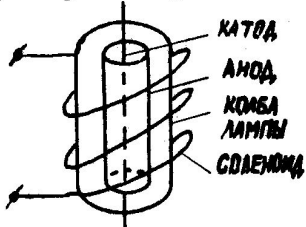


Рис.5.1

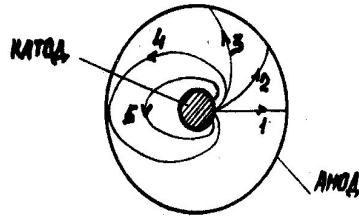


Рис.5.2

При наличии магнитного поля ($I_c \neq 0$) траектории электронов начинают искривляться под действием силы Лоренца (траектории 2 и 3 на рис.5.2). Причем, чем дальше электрон удалился от катода, тем больше его скорость из-за ускоряющего действия электрического поля и, следовательно, больше кривизна траектории.

Наконец, при некотором критическом значении индукции магнитного поля ($B_{кр}$) траектории движения электронов будут касаться анода (траектория 4 на рис.5.2). При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля ($B > B_{кр}$) электроны не попадают на анод и возвращаются к катоду (траектория 5 на рис.5.2).

Если допустить, что: магнитное поле однородно; электрическое поле является полем цилиндрического конденсатора; начальная скорость электронов, вылетающих с катода, равна нулю, то для критического значения магнитной индукции можно получить выражение

$$B_{кр} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{e}{m}}} \frac{\sqrt{U_a}}{R_a(1 - \frac{R_c^2}{R_a^2})}, \quad (6)$$

где R_a - радиус анода, R_c - радиус катода, $\frac{e}{m}$ - удельный заряд электрона.

Для лампы, используемой в установке, можно считать, что $R_c \ll R_a$. Тогда из соотношения (6) можно получить выражение для удельного заряда электрона

$$\frac{e}{m} = \gamma \frac{8U_a}{B_{кр}^2 \cdot R_a^2} \rightarrow 8,8 \cdot 10^{16} \text{ Кл/кг} \quad (7)$$

Поправочный коэффициент (γ) учитывает искажения электрического и магнитного полей, которые вызваны не точной коаксиальностью анода и катода, отклонением формы анода и катода от цилиндрической, неоднородностью магнитного поля из-за присутствия металлических электро-

дов внутри соленоида и некоторых других факторов. Величина индукции магнитного поля внутри длинного соленоида находится по формуле

$$B = \mu \mu_0 n I_c, \quad (8)$$

где I_c - величина силы тока в витках соленоида, $n = \frac{N}{l}$ - число витков, приходящихся на единицу длины соленоида, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/А}$ и магнитная проницаемость среды ($\mu \neq 1$).

На рис.5.3 изображена зависимость величины анодного тока I_a от величины тока соленоида I_c .

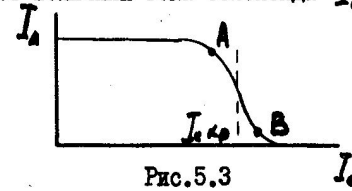


Рис.5.3

Критическое значение тока соленоида $I_{c\text{кр}}$ соответствует критическому значению магнитной индукции $B_{кр}$. Следует отметить, что при $I_c = I_{c\text{кр}}$ вместо резкого обрыва анодного

тока наблюдается более или менее размытый спад кривой. Это объясняется, в основном, двумя причинами. Во-первых, наличием некоторой начальной скорости у электронов, вылетающих с катода, и, во-вторых, как уже отмечалось ранее, искажением электрического и магнитного полей. Для определения величины $I_{c\text{кр}}$ следует взять середину участка графика между точками А и В, где график имеет наибольшую крутизну. На рис.5.4 приведена схема питания двухэлектродной лампы и соленоида.

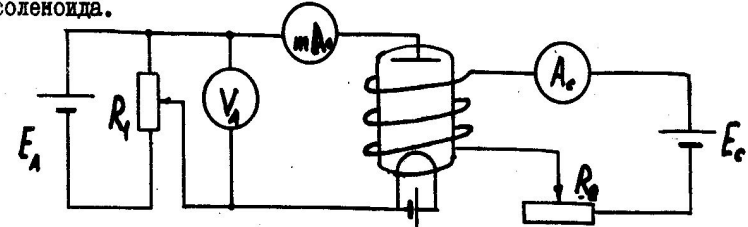


Рис.5.4

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Собрать схему установки (рис.5.4).
2. После проверки схемы установки включить источники напряжения.
3. Установить значение анодного напряжения U_a , указанное на рабочем месте.
4. Снять зависимость I_a/I_c . Для этого с помощью потенциометра R_2 следует постепенно увеличивать величину тока в соленоиде I_c .

Для построения графика зависимости $I_a(I_c)$ необходимо снять 10-15 экспериментальных точек, причем измерения следует проводить таким образом, чтобы большинство точек оказались на спадающей части графика (участок АВ на рис.5.3). Результаты измерений занести в табл.1.

5. Повторить измерения п.4 для других значений анодного напряжения, указанных на рабочем месте. Результаты измерений занести в табл.1.

Таблица 1

N	$U_{a1} =$		$U_{a2} =$		$U_{a3} =$	
	I_c	I_a	I_c	I_a	I_c	I_a
1						
2						
3						
...						
15						

6. Для каждого значения анодного напряжения U_a построить графики зависимости $I_a(I_c)$.

7. Для каждого графика определить $I_{c,кр}$.

8. Используя соотношения (7) и (8), определить значение удельного заряда электрона (e/m) для каждого значения анодного напряжения.

9. Вычислить среднее значение удельного заряда электрона и оценить погрешность результата.

Примечание: Погрешность измерения $I_{c,кр}$ следует определить из графика зависимости $I_a(I_c)$.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Используя данные работы, вычислить скорости электронов, с которыми они достигают анода ($V_a=0$).

2. Вычислить значение напряженности электрического поля на поверхности анода при одном из значений U_a .

3. Оценить максимальный радиус кривизны траектории, по которой двигаются электроны для случая, когда индукция магнитного поля достигает своего критического значения.

Контрольные вопросы

1. По какой траектории движется заряженная частица в однородном электрическом поле?

2. По какой траектории движется заряженная частица в однородном магнитном поле?

3. Что такое критическая величина индукции магнитного поля?

4. Что изменится, если изменить направление тока в витках соленоида?

5. Предложите другие методы измерения величины удельного заряда электрона.

Лабораторная работа 4.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ОТКЛОНЕНИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Цель работы

Целью данной работы является измерение отклонения пучка электронов в магнитном поле и определение удельного заряда электрона (отношение заряда электрона к его массе).

Подготовка к работе

При подготовке к работе следует изучить теоретический материал по теме: движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях [3, гл.17; 4, гл.10].

Если заряженная частица (q) движется со скоростью (\vec{v}) в магнитном поле (\vec{B}), то на нее действует сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}]. \quad (1)$$

Сила Лоренца направлена перпендикулярно как к направлению вектора индукции магнитного поля, так и к направлению скорости частицы. Следовательно, эта сила является центростремительной, не совершает работы и не изменяет величины скорости. Если частица движется в однородном магнитном поле перпендикулярно к направлению вектора индукции ($\vec{v} \perp \vec{B}$), то из соотношения (1) получаем

$$F = qvB. \quad (2)$$

Так как эта сила будет являться центростремительной, то

$$\frac{mv^2}{R} = qvB, \quad (3)$$

где R — радиус окружности, по которой будет двигаться частица.

Из соотношения (3) можно получить

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{RB}. \quad (4)$$

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

В лабораторной работе используется электронно-лучевая трубка

в которой пучок электронов перед тем, как попасть на экран, отклоняется магнитным полем. Принципиальная схема показана на рис.6.1.

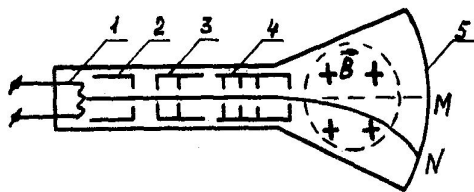


Рис.6.1

Электронный пучок ускоряется и фокусируется в электронной пушке (электроды 1-4 на рис.6.1), которая является частью электронно-лучевой трубки. Электронная пушка включает: накаливаемый катод (1), управляющий электрод (2), первый (3) и второй (4) аноды.

Изменяя потенциалы на анодах и управляющем электроде, можно фокусировать электронный пучок и менять его интенсивность.

Скорость V электронов, вышедших из электронной пушки, определяется разностью потенциалов U между катодом и вторым анодом. Если пренебречь начальной скоростью электронов, вылетающих с катода, то из закона сохранения энергии можно записать:

$$\frac{mV^2}{2} = eU, \quad (5)$$

где e - заряд электрона.

Из этого соотношения получаем выражение для скорости:

$$V = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (6)$$

За пределами электронной пушки электрическое поле отсутствует, поэтому электроны сохраняют величину своей скорости.

В отсутствие магнитного поля электроны попадают в точку M люминесцирующего экрана 5 (рис.6.1). В лабораторной установке электроны при выходе из электронной пушки попадают в поперечное магнитное поле, которое создается двумя последовательно включенными соленоидами. На рис.6.1 вектор магнитной индукции B направлен перпендикулярно плоскости рисунка. Воспользовавшись формулой для поля внутри длинного соленоида, получаем

$$B = \mu \mu_0 n I, \quad (7)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ - магнитная проницаемость ($\mu \approx 1$);

n - число витков, приходящихся на единицу длины соленоида; I - величина силы тока в витках соленоида; μ - коэффициент, учитывающий конкретную геометрию установки и ослабление магнитного поля между двумя соленоидами ($\mu < 1$). Значения величин n и μ приведены на рабочем месте.

На рис.6.2 изображена дуга окружности LN , по которой двигаются электроны в магнитном поле. Измеряя величину смещения луча на экране $MN = a$ и зная расстояние от электронной пушки до экрана $LM = b$, можно определить радиус кривизны дуги LN . Из рис. 6.2 видно, что

$$(R-a)^2 + b^2 = R^2. \quad (8)$$

Из этого соотношения получаем

$$R = \frac{a^2 + b^2}{2a} \cdot V \quad (9)$$

Используя соотношения (4) и (5), окончательно получаем

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 \cdot R^2} \cdot V \quad (10)$$

Значения B и R определяются, соответственно, соотношениями (7) и (9).

В лабораторной установке использована электронно-лучевая трубка электронного осциллографа. Фокусировка и изменение яркости пятна на экране трубки производится с помощью соответствующих ручек управления осциллографа. Электрическая схема лабораторной установки приведена на рис.6.3.

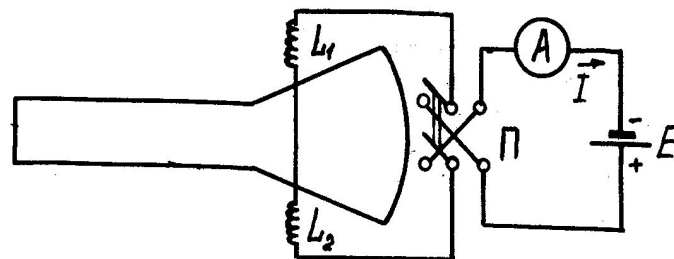


Рис.6.3

Цепь соленоида питается от источника постоянного тока (E). Величина тока в цепи регулируется коловым переключателем напряжения

источника и контролируется отдельным прибором - амперметром, включаемым на нужный предел шкалы (1А или 2А) установкой перемычки (штеккера). При этом кодовый переключатель на источнике устанавливается в положение 2 ампера.

Методические указания к выполнению лабораторной работы

1. Собрать схему установки, изображенную на рис.6.3.
2. Включить осциллограф и получить в центре экрана яркое сфокусированное светящееся пятно.
3. С помощью источника питания установить в цепи соленоида величину силы тока, указанную на рабочем месте, и измерить смещение Q_1 пятна на экране осциллографа.
4. С помощью переключателя Π изменить направление тока в соленоиде и измерить смещение Q_2 пятна на экране осциллографа.
5. Вычислить среднее значение смещения

$$\bar{Q} = \frac{|Q_1| + |Q_2|}{2} \quad (II)$$

6. Повторить измерения п п.3-5 для других значений величины силы тока в соленоиде, указанных на рабочем месте.
- Результаты измерений занести в таблицу:

N	I, А	Q, мм			R, м	B, Тл	$\frac{e}{m}, \frac{Кл}{кг}$
		Q ₁	Q ₂	\bar{Q}			

7. Используя соотношения (7) и (9), вычислить значения R и B для каждого значения величины силы тока в соленоиде.
8. Используя соотношение (10), вычислить значение удельного заряда электрона и определить среднее значение e/m .
9. Оценить погрешность определения e/m .

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Какой силы ток нужно пропустить через витки соленоида, чтобы электроны не попадали на экран осциллографа.
2. При одном из значений силы тока в соленоиде (по указанию преподавателя) определить:

- a) величину силы Лоренца, действующей на электрон в магнитном поле;
- б) ускорение электрона при его движении в магнитном поле;
- в) изменение импульса электрона за время его движения в магнитном поле;
- г) какое электрическое поле (по величине и направлению) нужно создать, чтобы электроны при прохождении магнитного поля не изменяли направление движения?

Контрольные вопросы:

1. По какой траектории двигается заряженная частица в однородном магнитном поле?
2. Почему поправочный коэффициент в соотношении (7) меньше единицы?
3. Предложите другие методы определения удельного заряда электрона.