

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ.....	2
ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ.....	12
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	20
МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ. ....	20
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА.....	26
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....	36
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	41
СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЖЕЛЕЗА.....	49

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: построить картину эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатических полей для некоторых простых случаев.

Приборы и принадлежности: специальная лабораторная установка, электролитическая ванна, набор электродов, гальванометр, потенциометр, электрический зонд.

### Теоретическое введение.

Всякий неподвижный заряд создает вокруг себя неменяющееся в пространстве и времени электростатическое поле, которое характеризуется в каждой точке вектором напряженности  $\vec{E}$  и величиной потенциала  $\varphi$ . Напряженностью электростатического поля в данной точке или его силовой характеристикой называется векторная величина, равная силе, с которой поле действует на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1)$$

$F$  - сила, действующая на пробный заряд  $q_0$

Графически поле принято изображать силовыми линиями, касательные к которым в любой точке совпадают по направлению с вектором напряженности электростатического поля  $\vec{E}$ . Численное значение напряженности поля характеризуется густотой силовых линий. Энергетической характеристикой поля является потенциал, который представляет собой физическую величину, численно равную потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля (или работе перемещения единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность)

$$\varphi = \frac{W}{q_0} = \frac{A}{q_0} \quad (2)$$

Разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  - измеряется работой, которую поле может совершить, перемещая единичный положительный заряд из одной точки поля в другую.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0} \quad (3)$$

Величины напряженности и потенциала поля, образованного точечным зарядом  $q$ , в системе СИ рассчитываются по формулам:

$$E = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 r^2} ; \quad \varphi = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 r} , \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$  - электрическая постоянная,

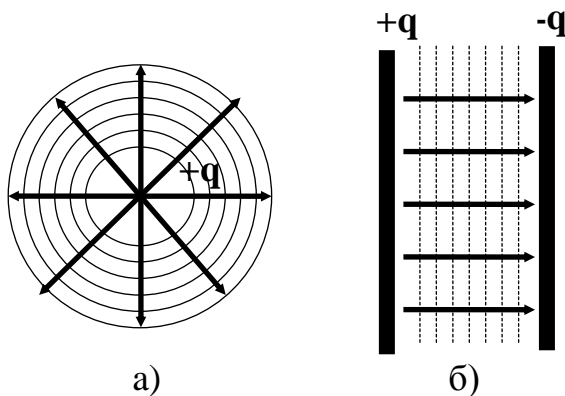


Рис 1. Графическое изображение электростатического поля:  
 а) точечного заряда;  
 б) плоского конденсатора

$\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Из формулы (4) следует, что потенциал является функцией расстояния от данной точки до заряда, его создающего, и что одному и тому же значению потенциала удовлетворяет бесконечное множество точек, расположенных на поверхности сферы радиуса  $r$ . В общем случае поверхности, все точки которых имеют одинаковый потенциал ( $\varphi = \text{const}$ ), называются эквипотенциальными поверхностями. Так, эквипотенциальные поверхности поля точечного заряда представляют собой концентрические сферические поверхности (рис.1а). В однородном поле заряженного плоского конденсатора эквипотенциальные поверхности имеют вид параллельных плоскостей (рис.1б).

Работа перемещения точечного заряда  $q_0$  по эквипотенциальной поверхности всегда равна нулю, так как  $\varphi_1 = \varphi_2$ , следовательно,

$$A_{12} = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \quad (5)$$

Эту же работу можно записать по формуле:

$$A_{12} = q_0 E dl \cos \alpha, \quad (6)$$

где  $dl$  - отрезок пути,  $\alpha$  - угол между направлением перемещения и вектором напряженности  $\vec{E}$ .

Так как  $A_{12} = 0$ , то  $q_0 E dl \cos \alpha = 0$ , откуда получаем, что  $\cos \alpha = 0$ , то есть  $\alpha = 90^\circ$ . Следовательно, линии напряженности всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям.

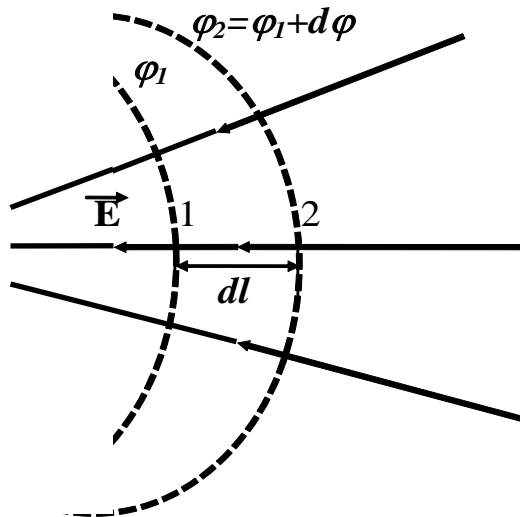


Рис 2. К расчету работы по перемещению пробного заряда в электрическом поле

Характеристики

электростатического поля -

силовая ( $\vec{E}$ ) и энергетическая ( $\varphi$ )

- связаны между собой.

Действительно, пусть на

расстоянии  $dl$  находятся две

эквипотенциальные поверхности

с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2 = \varphi_1 +$

$d\varphi$ . Работа по элементарному

перемещению пробного заряда  $q_0$

на расстояние  $dl$  по силовой

линии (рис.2) определяется формулой (7):

$$dA = F dl = q_0 E dl, \quad (7)$$

С другой стороны:

$$dA = q_0 [\varphi_1 - (\varphi_1 + d\varphi)] = - q_0 d\varphi \quad (8)$$

Сравнивая (7) и (8), получим:

$$q_0 E dl = - q_0 d\varphi, \quad E = - \frac{d\varphi}{dl} \quad (9)$$

Величина  $\frac{d\varphi}{dl}$ , характеризующая быстроту изменения потенциала в направлении силовой линии, называется \_градиентом потенциала.

Знак минус показывает, что вектор напряженности электрического поля, численно равный градиенту потенциала, направлен в сторону убывания потенциала. Для однородного поля формулу (9) можно записать следующим образом:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l},$$

где  $U$  - напряжение между точками, взятыми на силовой линии,  $l$  - расстояние между *данными* точками.

В системе СИ напряженность электрического поля  $E$  измеряется в  $\frac{В}{М}$ , потенциал  $\varphi$  - в В. Исследование электростатического поля сводится к построению силовых линий поля, то есть нахождению вектора напряженности в любой точке поля. На практике бывает легче найти сначала расположение эквипотенциальных поверхностей, а затем построить систему силовых линий.

В работе используется метод изучения электростатического поля, основанный на создании другого эквивалентного ему поля (метод моделирования). Применение этого метода основано на том, что слабые токи в растворах электролитов можно рассчитывать по дифференциальной форме закона Ома:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (11)$$

где  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля в данной точке,  $\sigma$  - электропроводность электролита,  $\vec{j}$  - вектор плотности тока, направление которого совпадает с направлением движения положительных зарядов (с направлением  $\vec{E}$ ).

Величину плотности тока можно найти по формуле:  $j=I/S$ , где  $I$ - сила тока,  $S$  -площадь сечения, через которую проходит заряд.

Поле тока характеризуется линиями плотности тока, аналогичными силовым линиям электростатического поля. Замена изучения поля

неподвижных зарядов изучением поля тока позволяет применить в качестве зондов металлические электроды, так как в проводящей среде стекание зарядов с острия и выравнивание его потенциала с потенциалом данной точки поля происходит автоматически. Существует ряд методов нахождения эквипотенциальных поверхностей. Рассмотрим два из них.

### Первый метод.

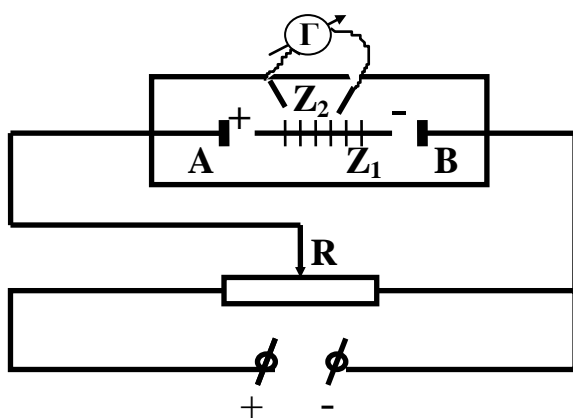


Рис 3. Схема установки

Нахождение эквипотенциальных поверхностей можно осуществить по схеме, представленной на рис.3. В ванне с двумя электродами А и В находится слабый раствор электролита. На электроды подается напряжение. К гальванометру присоединяются

два острых металлических зонда, один из них  $Z_1$  устанавливают неподвижно на расстоянии 1-1,5 см от одного из электродов по прямой АВ. С помощью другого зонда  $Z_2$  отыскивают несколько точек, потенциалы которых равны потенциалу точки, в которой помещен первый зонд, то есть находят точки одной эквипотенциальной линии. При этом гальванометр должен показывать отсутствие тока. Затем первый зонд перемещают в другую точку с новым потенциалом и аналогично с помощью второго зонда находят положение другой эквипотенциальной линии.

### Второй метод.

Собирают электрическую цепь по схеме, данной на рис.4, реализующей собой так называемый мост. К потенциометру R, соединенному с источником постоянного напряжения, присоединяют электроды А и В, которые помещают в электролитическую ванну, заполненную раствором электролита слабой проводимости. В частности, для заполнения ванны

можно использовать водопроводную воду. Между электродами создается поле постоянного тока.

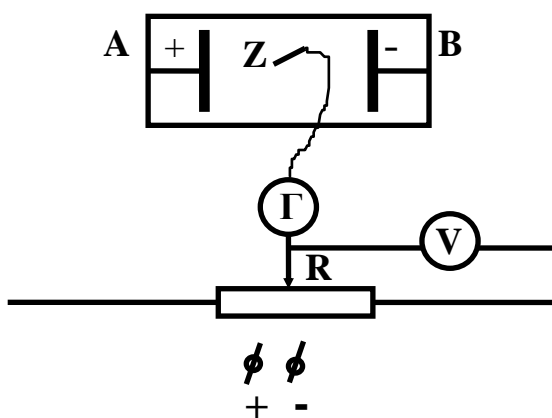


Рис 4. Схема установки

Измерительная схема работает по следующему принципу: перемещением движка на потенциометре придают движку различные значения потенциала. Устанавливают зонд Z (заостренный металлический проводник) в какой-либо точке поля. Если зонд

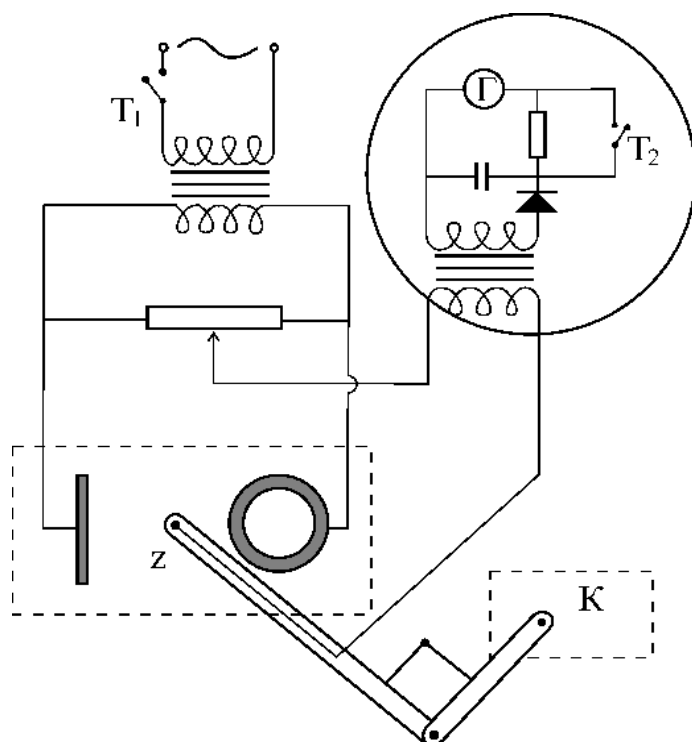
находится в точке поля, потенциал которой равен потенциалу движка потенциометра, ток в цепи отсутствует, то есть стрелка гальванометра находится на нуле. Геометрическое место точек поля, для которых гальванометр показывает отсутствие тока, соответствует одной из эквипотенциальных поверхностей исследуемого поля. (На опыте получают не поверхность, а ее горизонтальное сечение - линию).

Придавая движку потенциометра различное значение потенциала и перемещая зонд в ванне, находят по 5-6 точек, соответствующих разным эквипотенциальным линиям.

Для исследования электростатического поля в данной лабораторной работе используется специальная установка (рис.5), в которую входит ванна с раствором электролита и два электрода произвольной формы. На зажимы электродов от понижающего трансформатора подается переменное напряжение около 4В. Использование переменного напряжения вызвано тем, что оно устраняет явление поляризации электродов. Установка работает по схеме, аналогичной той, что представлена на рис.4, но с некоторыми усложнениями.

В частности, потенциалы с зонда и движка потенциометра подаются на фазовый дискриминатор (Ф.Д.), где они сравниваются по амплитуде и фазе,

а затем регистрируются гальванометром, включенным на выходе фазового дискриминатора. На лицевой панели установки представлена принципиальная электрическая схема Ф.Д. и расположены клеммы для присоединения электродов, клеммы делителя напряжения (потенциометра), средней точки потенциометра, зонда и гальванометра, а также тумблеры  $T_1$  - для выключения напряжения и  $T_2$  - для изменения чувствительности схемы.



Метод нахождения эквипотенциальных поверхностей аналогичен рассмотренному ранее второму методу. Положение точек равного потенциала фиксируется графически на листе бумаги с помощью пантографа (рис.5) в масштабе - 1:2. К концу одного рычага пантографа прикреплен зонд  $Z$ , который может перемещаться в

горизонтальной плоскости **по дну** ванны. Нижний конец зонда помещен в электролит, а верхний при помощи гибкого провода соединен с гальванометром. На конце другого рычага пантографа прикреплен стержень  $K$  с острием. С помощью пружины стержень в обычном положении приподнят над бумагой и движется вместе с зондом  $Z$  в горизонтальной плоскости. Найденные зондом точки эквипотенциальных поверхностей наносятся на бумагу путем нажима на стержень  $K$ . Полученные точки соединяются пунктиром, образуя линию эквипотенциальной поверхности.

#### Порядок выполнения работы.

1. Собрать электрическую цепь, для чего делитель напряжения, гальванометр, зонд, подсоединить к соответствующим клеммам на панели установки.



2. Установить в ванне систему из двух указанных преподавателем электродов.
3. Поместить лист бумаги в крепление стола пантографа.
4. Обвести зондом контуры поверхности электродов и получить на листе бумаги их горизонтальное сечение.
5. Тумблером  $T_2$  установить положение в “*грубо*”
6. Поместить зонд вблизи одного из электродов, а движок делителя напряжения у того конца потенциометра, к которому присоединен этот электрод.
7. Тумблером  $T_1$  включить питание установки.
8. Перемещением движка потенциометра добиться нулевого положения стрелки гальванометра, только после этого перевести тумблер  $T_2$  в положение “*точно*”. Найти положение движка, соответствующее отсутствию тока в цепи гальванометра.
9. Перемещая зонд таким образом, чтобы стрелка гальванометра по-прежнему показывала нуль, найти и зафиксировать на листе бумаги не менее 6-8 точек, принадлежащих исследуемой эквипотенциальной линии,
10. Соединяя плавной пунктирной кривой найденные точки, построить эквипотенциальную линию.
11. Аналогично построить не менее 6 эквипотенциальных линий, каждая из которых задается новым положением движка потенциометра.
12. Для исследуемого поля начертить на бумаге картины эквипотенциальных поверхностей и по ним построить систему силовых линий.
13. По картине эквипотенциальных и силовых линий рассчитать отношение напряженностей  $E_1$  и  $E_2$ , взятых вблизи двух электродов на одной силовой линии. Для этого сделать следующее. На электродах вблизи выбранных точек 1 и 2, лежащих на одной силовой линии, наметить точки  $a_1$  и  $a_2$ ,  $b_1$  и  $b_2$ . (рис.6) Измерить длины линий  $a_1 b_1$  и  $a_2 b_2$ , обозначив их соответственно  $l_1$  и  $l_2$ . Поскольку налитый в ванну раствор электронейтрален, из теоремы Гаусса следует  $E_1 l_1 = E_2 l_2$ .

Отсюда находим искомое соотношение:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{l_2}{l_1} .$$

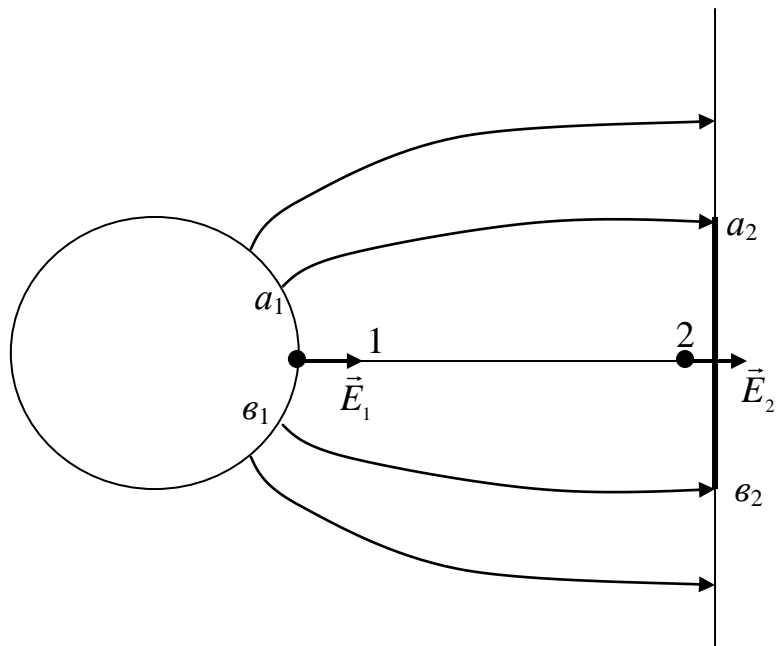


Рис.6. Схема определения отношения напряженностей эл. поля для разных точек силовой

### Контрольные вопросы.

1. Дать понятие электростатического поля и его основных характеристик.
2. Написать и проанализировать формулы для напряженности и потенциала поля точечного заряда.
3. Что такое эквипотенциальные поверхности? Как они расположены относительно силовых линий?
4. Какие существуют методы исследования электростатических полей?

### Литература:

1. Зисман Г. А., Тодес О. М.. Курс общей физики для втузов: в 3 т. Т. 2. - М.: Наука, 1974. - 340 с.
2. Яворский Б. М., Пинский А.А. Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. Т.1.-М.: Наука,1981.
3. Детлаф А. А. , Яворский Б. М. Курс физики: Учебн. пособие для втузов. - М.: Высшая школа, 1989. - 607 с. - предм. указ.: с. 588-603.
4. Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие для студентов втузов/ Б. Ф. Алексеев, К. А. Барсуков, И. А. Войцеховская и др.; Под ред. К. А. Барсукова и Ю. И. Уханова. – М.: Высш. школа,1988. – 351 с.: ил.

## ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы: изучить методы измерения электроемкостей; проверить формулы расчета емкостей при соединении конденсаторов в батареи.

Приборы и принадлежности: источник регулируемого переменного напряжения, вольтметр, амперметр, генератор звуковой частоты, реохорд, эталонные емкости, индикатор тока (осциллограф), конденсаторы неизвестной емкости.

### Теоретическое введение

Емкостью конденсатора называется величина, определяемая отношением заряда на обкладках конденсатора к разности потенциалов (напряжению) между ними.

$$C = \frac{q}{\Delta\phi} = \frac{q}{U} \quad (1)$$

Конденсаторы могут быть соединены в батареи. При последовательном соединении  $n$  конденсаторов (см. рис.1) емкость батареи  $C'$  определяется из соотношения:

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2)$$

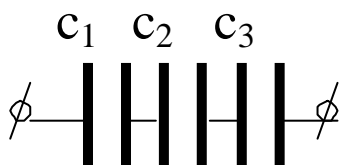


Рис.1. Последовательное соединение конденсаторов

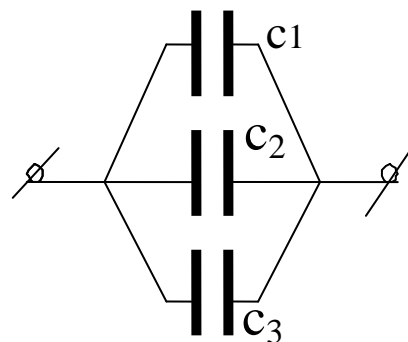


Рис.2. Параллельное соединение конденсаторов

При параллельном соединении (см.рис.2) общая емкость  $C''$  равна сумме емкостей конденсаторов

$$C'' = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (3)$$

Единицей измерения емкости в системе СИ является Фарад (Ф).

На практике широко используются:

1 микроФарад (  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$  ) и

1 пикоФарад (  $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$  ).

Иногда емкость конденсатора может быть рассчитана по формуле.

Например, известны формулы для емкости плоского и сферического конденсаторов:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}; \quad C = \frac{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R \cdot r}{R - r} \quad (4)$$

Однако чаще емкость конденсатора определяют из электрических измерений.

Существует несколько способов измерения емкости. Один из них основан на измерениях, так называемого, емкостного сопротивления конденсатора  $R_c$  в цепи переменного тока (см. рис. 3).

Из теории переменного тока известно:

$$R_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}, \quad (5)$$

(5)

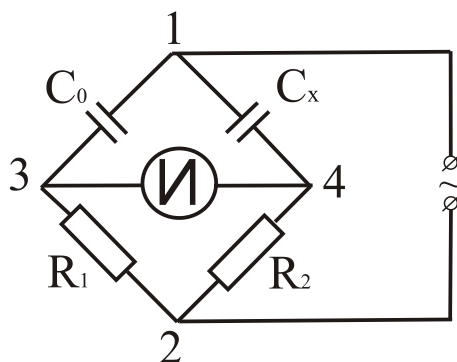


Рис.4. Схема установки

где  $\omega$  - циклическая частота тока (  $\omega = 2\pi\nu$  ),  $U_{\text{эф}}$ ,  $I_{\text{эф}}$  - эффективные значения напряжения и тока.

Используя выражение (5), получим формулу для расчета емкости:

$$C = \frac{I_{\text{эф}}}{\omega \cdot U_{\text{эф}}} = \frac{I_{\text{эф}}}{2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot U_{\text{эф}}} \quad (6)$$

Другой метод измерения емкости основан на сравнении двух емкостей, включенных в схему моста переменного тока.

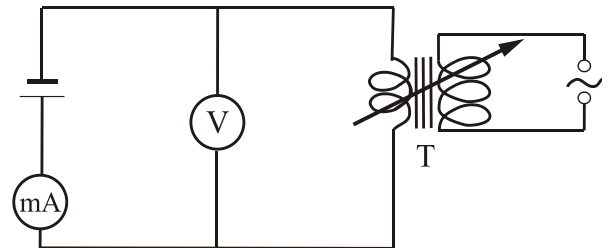


Рис.3. Схема установки для измерения емкости конденсаторов

Такая схема показана на рис.4. Здесь  $C_o$  - конденсатор с известной емкостью,  $C_x$  - конденсатор с искомой емкостью.  $R_1$ ,  $R_2$  - омические сопротивления переменной величины,  $I$  - индикатор тока. Изменяя соотношение между сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , можно добиться равенства потенциалов точек 3 и 4, что соответствует условию равновесия моста переменного тока, т.е.  $\varphi_3 = \varphi_4$ . Это равенство можно преобразовать так:

$$\varphi_3 - \varphi_2 = \varphi_4 - \varphi_2 \quad (7)$$

$$\varphi_1 - \varphi_3 = \varphi_1 - \varphi_4 \quad (8)$$

Пусть в состоянии равновесия по плечам 1-3-2 моста течет ток с эффективным значением  $I_1$ , а по плечам 1-4-2 - ток  $I_2$ .

Тогда в соответствии с законом Ома для плеч 2-3 и 2-4 можно записать:

$$\varphi_3 - \varphi_2 = I_1 \cdot R_1,$$

$$\varphi_4 - \varphi_2 = I_2 \cdot R_2$$

с учетом соотношения (7)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (9)$$

Аналогично:

$$\varphi_1 - \varphi_3 = I_1 \cdot R_{Co},$$

$$\varphi_1 - \varphi_4 = I_2 \cdot R_{C\bar{o}}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{Cx}}{R_{Co}}$$

и с учетом уравнения (5)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega \cdot Co}{\omega \cdot C_x} = \frac{Co}{C_x} \quad (10)$$

Из сравнения (9) и (10) вытекает

$$\frac{Co}{C_x} = \frac{R_2}{R_1}, \Rightarrow C_x = Co \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (11)$$

Таким образом, неизвестная емкость легко может быть найдена по эталонной емкости и отношению сопротивлений.

### Порядок выполнения работы.

#### I. Измерения с помощью амперметра и вольтметра.

1. Собрать цепь по схеме рис.3. В качестве  $C_x$  взять одну из неизвестных емкостей ( $C_1$ )
2. Включить цепь в сеть. Постепенно увеличивая напряжение, провести измерения эффективного напряжения и тока 5 раз. Полученные данные занести в таблицу 1. Желательно проводить измерения при  $U > 80$  В (см. замечания об электроизмерительных приборах).

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

Измеряемая емкость	$U_{\text{эф}}, В$	$I_{\text{эф}}, мА$	$C_x, мкФ$	Относительная погрешность $\frac{\Delta C_x}{C_x}, мкФ$	Абсолютная погрешность $(\Delta C_x)_{\text{сл}}, мкФ$
$C_1$					
$C_2$					
Последовательное соединение $C'$					
Параллельное Соединение $C''$					

С помощью регулятора уменьшить напряжение до нуля и выключить цепь из сети.

3. В качестве  $C_x$  взять другой конденсатор ( $C_2$ ). Повторить операции, указанные в п.2.
4. Соединить емкости  $C_1$  и  $C_2$  последовательно, повторить операции, указанные в п.2.
5. Соединить емкости  $C_1$  и  $C_2$  параллельно, повторить операции, указанные в п.2.
6. Рассчитать емкости по формуле (6) для каждого случая. (Частота тока в сети  $\nu = 50$  Гц). Найти средние значения  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C'$  и  $C''$ , а также случайные погрешности по методу Стьюдента.
7. Рассчитать относительную приборную погрешность измерений по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta C_2}{C_x} = \frac{\Delta I_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}} + \frac{\Delta U_{\text{эф}}}{U_{\text{эф}}}, \quad (12)$$

где  $\Delta I_{\text{эф}} = I_{\text{пред}} \cdot 0,01 \cdot \varepsilon_n'$ ,  $\Delta U_{\text{эф}} = U_{\text{пред}} \cdot 0,01 \cdot \varepsilon_n''$ ,  $\varepsilon_n'$ ,  $\varepsilon_n''$  - класс точности амперметра и вольтметра (см. сведения о приборах). По значению относительной погрешности найти абсолютные погрешности  $\Delta C_1$ ,  $\Delta C_2$ ,  $\Delta C'$ ,  $\Delta C''$  из формулы:  $\Delta C_x = \varepsilon \cdot C_x$ , где  $C_x$  – средние значения искомым емкостей в таблице 1.

Записать окончательный результат с указанием доверительного интервала, рассчитанного по случайной и приборной погрешности по формуле

$$\Delta C_{\text{полн.}} = (\Delta C_{\text{сл.}}^2 + \Delta C_{\text{приб.}}^2)^{1/2}.$$

8. Провести проверку формул последовательного (2) и параллельного (3) соединений конденсаторов. Для этого рассчитать  $C'$  и  $C''$  по формулам (2) и (3). Расчетные величины  $C'$  и  $C''$  сравнить со средними опытными. Сделать вывод.



## II. Измерения с помощью моста.

1. Собрать цепь по схеме моста, представленной на рис.5. Эта схема является разновидностью схемы 4. Вместо сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  использованы плечи реохорда длиной  $l_1$  и  $l_2$ .

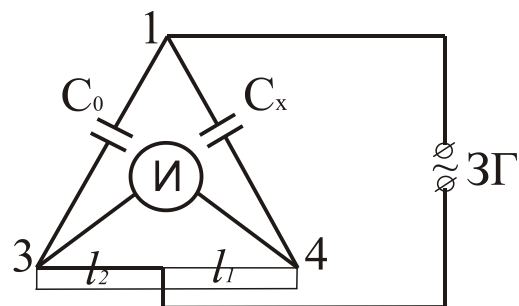


Рис. 5 Схема установки

Так как  $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ , то формула (11) принимает вид:

$$C_x = C_0 \cdot \frac{l_1}{l_2} \quad (13)$$

В качестве индикатора используется осциллограф. Равновесие моста контролируется по минимуму амплитуды осциллограммы. Показанный в схеме конденсатор  $C_0$  расположен на панели с известными емкостями, в качестве источника переменного тока используется генератор звуковой частоты.

2. Движок реохорда поставить на середину ( $l_1 = l_2 = 50$  см), подобрать наиболее подходящее для  $C_1$  значения  $C_0$ . Затем с помощью движка реохорда добиться полного уравнивания моста. Полученные данные  $C_0$ ,  $l_1$  и  $l_2$  записать в таблицу 2
3. Аналогичные измерения выполнить для емкости  $C_2$  и соединений  $C'$  и  $C''$ .
4. Рассчитать измеряемые емкости по формуле (12) для каждого случая. Найти средние значения  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C'$  и  $C''$ .
5. Рассчитать относительную погрешность измерений каждой емкости по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta C_0}{C_0} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_2}{l_2}, \quad (14)$$

приняв  $\frac{\Delta C_0}{C_0} = 0,10$ ,  $\Delta l_1 = \Delta l_2 = 0,2$  см.

Случайная погрешность в этом методе не рассчитывается, т.к. она значительно меньше приборной.

Найти абсолютную погрешность ( $\Delta C_x = \varepsilon C_x$ ) и записать окончательный результат в таблицу.

6. Сравнить результаты двух методов. Сделать анализ и записать выводы.

Таблица 2

Результаты измерений и вычислений

Измеряемая емкость	$C_0, \text{ мкФ}$	$l_1, \text{ см}$	$l_2, \text{ см}$	$C_x, \text{ мкФ}$	Среднее значение $C_x, \text{ мкФ}$	Приборная погрешность $(\Delta C_x)_{\text{пр}}, \text{ мкФ}$
$C_1$						
$C_2$						
Последовательное соединение $C''$						
Параллельное соединение $C'''$						

Контрольные вопросы.

1. Что называется емкостью конденсатора? Единицы ее измерения.
2. Как доказать справедливость формулы для расчета последовательного и параллельного соединений конденсаторов?
3. Как влияет сопротивление приборов на точность измерения по схеме (см. рис.3). С какими величинами внутренних сопротивлений следует выбрать вольтметр и амперметр?
4. Что представляет собой мост переменного тока? Условие равновесия моста.

5. Почему желательно уравновесить мост при условии  $l_1=l_2$ ? (Обратите внимание на формулу (13)).
6. Какой из рассмотренных методов, по вашему мнению, предпочтительней и почему?

Литература:

1. Зисман Г. А., Тодес О. М.. Курс общей физики для втузов: в 3 т. Т. 2. - М.: Наука, 1974. - 340 с.
2. Калашников С.Г. Электричество.-М.: Наука. 1970.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ.

Цель работы: Ознакомиться с методом компенсации напряжений и измерить ЭДС источников постоянного тока.

Приборы и принадлежности: источник постоянного тока, нормальный элемент Вестона, реохорд, гальванометр, реостат, однополюсный переключатель, ключ.

### Теоретическое введение

Перемещение свободных зарядов во внешней части электрической цепи происходит под действием электрического поля, при этом разность потенциалов на клеммах источника тока должна уменьшаться. Для поддержания постоянства разности потенциалов внутри источника тока должен происходить перенос зарядов против сил электрического поля. Такую работу могут выполнять лишь силы неэлектростатического происхождения, так называемые сторонние силы. Сторонние силы возникают, например, в результате химических реакций (в гальванических элементах или аккумуляторах), в результате диффузии носителей тока в неоднородной среде, в результате действия магнитного поля на электроны в движущемся проводнике (в генераторах) и т.д.

Устройство, в котором работают сторонние силы, поддерживающие постоянной разность потенциалов на полюсах, и есть источник тока. Физическая величина, характеризующая действие сторонних сил, называется электродвижущей силой источника тока (ЭДС).

Существует несколько толкований физического смысла ЭДС ( $\varepsilon$ ).

1. Из закона Ома для полной цепи имеем:

$$\varepsilon = I(R + r) = IR + Ir = U + u \quad (1)$$

ЭДС источника тока равна сумме падений напряжения на внешнем ( $IR$ ) и внутреннем ( $Ir$ ) сопротивлениях цепи (динамическое определение).

2. Рассматривая работу источника тока по перемещению заряда  $q$  по всей цепи, запишем:

$$A = I U t + I u t = It(U + u) = q\varepsilon \quad (2)$$

Откуда получаем:

$$\varepsilon = \frac{A}{q} \quad (3)$$

ЭДС источника тока равна работе по перемещению единичного положительного заряда по всей цепи (энергетическое определение).

3. Рассмотренная выше ЭДС может быть записана как циркуляция вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  по замкнутому контуру (цепи), то есть

$$\varepsilon = \oint E_l dl, \quad (4)$$

где  $E_l$  - проекция вектора  $\vec{E}$  на направление перемещения. В отличие от электростатического поля, интеграл (4) отличен от нуля вследствие действия в источнике сторонних сил.

4. Используя закон Ома для однородного участка цепи и для полной цепи, запишем выражение для падения напряжения следующим образом:

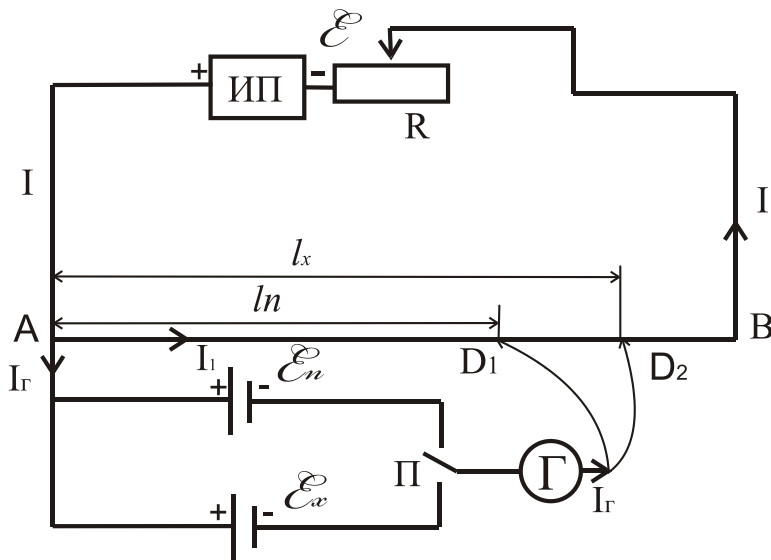
$$U = I \cdot R = \frac{\varepsilon}{R+r} R = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{r}{R}} \quad (5)$$

Полагая, что  $R \rightarrow \infty$ , получим

$$U \rightarrow \varepsilon \quad (6)$$

Т.е. ЭДС источника тока равна напряжению на полюсах источника тока при разомкнутой внешней цепи ( $R \rightarrow \infty$ ). На этом определении основан метод измерения ЭДС высокоомным вольтметром. Так как сопротивление вольтметра намного больше сопротивления источника ( $R \gg r$ ), то в формуле (1) величиной  $Ir$  можно пренебречь. Тогда  $\varepsilon \approx IR = U$

На этом определении основан метод измерения ЭДС высокоомным вольтметром ( $R \gg r$ ).



Достаточно точно ЭДС источника можно измерить методом компенсации. Схема цепи для таких измерений представлена на рис.1.

Метод компенсации состоит в том, что при включении источника

питания (ИП) и замыкания

Рис. 1. Схема установки

переключателя П (на один из источников  $\varepsilon_n$  или  $\varepsilon_x$ ) изменением положения ползунка реохорда добиваются отсутствия тока в гальванометре ( $I_{\Gamma} = 0$ ). При этом падение напряжения на участке реохорда AD компенсирует ЭДС элемента, включенного в цепь гальванометра.

Запишем уравнение для контура АПДА, применив второе правило Кирхгофа:

$$I_1 R_{AD} - I_{\Gamma} (+ R_{\Gamma} + r_n) = \varepsilon_n \quad (7)$$

При  $I_{\Gamma} = 0$  получаем,

$$I_1 R_{AD} = \varepsilon_n \quad \text{или} \quad I_1 \cdot \rho \frac{l_n}{S} = \varepsilon_n \quad (8)$$

Аналогично, при замыкании переключателя П на исследуемый элемент  $\varepsilon_x$  изменением положения движка реохорда добиваются компенсации неизвестной ЭДС падением напряжения на участке AD<sub>2</sub>. Следовательно,

$$I_1 \cdot \rho \frac{l_x}{S} = \varepsilon_x \quad (9)$$

В обоих случаях величина тока  $I_1$ , текущего по реохорду, должна быть одной и той же. Из уравнений (8) и (9), получим

$$\frac{l_n}{l_x} = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_x} \quad (10)$$

откуда

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \cdot \frac{l_x}{l_n} \quad (11)$$

Таким образом, измерив  $l_x$  и  $l_n$  на опыте и зная величину ЭДС нормального элемента ( $\varepsilon_n$ ), можно определить неизвестную ЭДС -  $\varepsilon_x$

Примечание: Нормальный элемент Вестона применяется в качестве эталона ЭДС. При  $t = 20^\circ \text{ C}$ ,  $\varepsilon_n = 1,0183 \text{ В}$ ,  $r = 1000 \text{ Ом}$ . Во избежании поляризации элемента его следует замыкать на сопротивление не ниже 10 000 Ом (ток не выше 0,1 мА).

#### Порядок выполнения работы.

1. Собрать электрическую цепь по схеме, указанной на рис.1, при этом обратив особое внимание на полярность источников.
2. Включить источник питания. Ползунок передвинуть ближе к концу В. Переключателем П включить в цепь испытуемый источник  $\varepsilon_x$ .
3. Изменяя сопротивление реостата  $R$ , найти положение, близкое к состоянию компенсации. Полной компенсации ( $I_G = 0$ ) добиться с помощью передвижения ползунка реохорда D.
4. Разомкнуть переключатель П. Записать в таблицу значение  $l_x$ .
5. Переключателем П включить нормальный элемент. Не изменяя величины сопротивления  $R$ , добиться компенсации с помощью перемещения ползунка реохорда.
6. Разомкнуть переключатель П. Записать значение  $l_n$ .
7. Немного изменить сопротивление реостата  $R$ , а, следовательно, силу тока  $I$ , снова найти положения компенсации вначале для  $\varepsilon_x$ , а затем для  $\varepsilon_n$ . Провести для каждого источника по пять измерений при различных значениях тока  $I$ . Полученные данные занести в таблицу 1.

8. По формуле (11) рассчитать величину  $\varepsilon_x$  для каждого случая.
9. Провести обработку полученных данных для  $\varepsilon_x$  по методу Стьюдента. Записать окончательный результат.

Таблица 1.

Результаты измерений и вычислений

<i>№ n/n</i>	<i><math>l_x, \text{см}</math></i>	<i><math>L_n, \text{см}</math></i>	<i><math>\varepsilon_x, \text{В}</math></i>
1			
2			
3			
4			
5			

Контрольные вопросы.

1. Что такое ЭДС источника тока? Различные определения ЭДС.
2. Правила Кирхгофа для разветвленной цепи постоянного тока.
3. Изобразить схему электрической цепи для определения ЭДС источника методом компенсации. Пояснить принцип компенсационного метода.
4. Вывод расчетной формулы для  $\varepsilon_x$ .
5. Объясните, почему при сдвиге ползунка от положения компенсации влево или вправо, стрелка гальванометра отклоняется в одну или в другую сторону.
6. Какие требования предъявляются к вольтметру для измерения ЭДС источника с заданной точностью?



### Литература:

1. Зисман Г. А., Тодес О. М.. Курс общей физики для вузов: в 3 т. Т. 2. - М.: Наука, 1974. - 340 с.
2. Яворский Б. М., Пинский А.А. Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. Т.1.-М.: Наука,1981.
3. Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие для студентов вузов/ Б. Ф. Алексеев, К. А. Барсуков, И. А. Войцеховская и др.; Под ред. К. А. Барсукова и Ю. И. Уханова. – М.: Высш. школа,1988. – 351 с.: ил.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА

Цель работы: – определить удельное сопротивление водного раствора сульфата меди при различных концентрациях.

Приборы и принадлежности: звуковой генератор, реохорд, магазин сопротивлений, осциллограф, трубки с растворами  $\text{CuSO}_4$ .

## Теоретическое введение

Электролиты – это вещества, диссоциирующие в растворах или в расплавах на ионы. К ним относятся кислоты, соли, щелочи, а также расплавы солей. Процесс самопроизвольного распада растворенного вещества на ионы называют электролитической диссоциацией (Аррениус, 1883–1887). Количественной мерой электролитической диссоциации служит степень диссоциации  $\alpha$ , равная отношению числа продиссоциировавших молекул растворенного вещества к их первоначальному количеству. Существенной особенностью электролитической диссоциации является ее динамический характер. В растворе непрерывно происходят многократные акты диссоциации электролита на ионы и соединения ионов в молекулу – результатом является установление состояния равновесия, характеризующиеся постоянством концентраций ионов и молекул в растворе.

Химические процессы, протекающие на электродах при прохождении через электрохимическую ячейку постоянного электрического тока, получили название электролиза. Основные законы электролиза были экспериментально установлены М. Фарадеем в 1834 г.

Первый закон Фарадея: масса  $m$  выделившегося на электроде вещества прямо пропорциональна электрическому заряду  $q$ , прошедшему через электролит:

$$m = k q \text{ или } m = k \cdot I \cdot t, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, численно равный массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит единицы электрического заряда, называется электрохимическим эквивалентом вещества;  $I$  – постоянный ток;  $t$  – время.

Второй закон Фарадея: электрохимические эквиваленты элементов прямо пропорциональны их химическим эквивалентам:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{Z}, \quad (2)$$

где  $F = 9,65 \cdot 10^7$  Кл/кг-экв. – число Фарадея,  $A$ ,  $Z$  – атомный вес и валентность элемента, соответственно.

При отсутствии внешнего электрического поля ионы в электролите совершают хаотическое тепловое движение. При наличии внешнего поля движение ионов упорядочивается: положительные ионы начинают двигаться по полю, а отрицательные – против поля.

Одна из моделей, описывающая механизм ионного транспорта в жидкостях, предложена Я.И. Френкелем. Согласно этой модели каждый ион в течение некоторого времени колеблется около определенного положения равновесия (положение  $I$ , рис. 1). Время от времени в результате тепловых флуктуаций ион, преодолевая потенциальный барьер высотой  $U$ , перескакивает через седловую точку  $C$  в соседние устойчивые положения  $II$ , отстоящие от предыдущего на расстояние  $r_0$  порядка размеров самих ионов. Таким образом, ион совершает хаотическое блуждание внутри жидкости, пребывая часть времени около определенных мест. В отсутствие электрического поля прыжки совершаются с одинаковой вероятностью во всех направлениях, поэтому какого-либо направленного движения ионов не существует. Средняя длительность колебаний около одного и того же положения равновесия оказывается у каждой жидкости определенной величиной, резко убывающей при повышении температуры. В связи с этим при повышении температуры вследствие увеличения вероятности перескока сильно возрастает подвижность ионов, что в свою очередь влечет за собой

уменьшение вязкости жидкости. Направленное движение ионов, т.е. ток, возникает, если вероятности прыжков в каком-либо определенном направлении становятся преобладающими. Это происходит, например, при наложении градиента потенциала, облегчающего прыжки в направлении поля  $\vec{E}$ . В этом направлении высота потенциального барьера уменьшается на величину  $\delta U = eEr_0/2$ . Электрический ток в электролитах обусловлен встречным движением разноименных ионов. Плотность тока, протекающего через электролит, определяется выражением:

$$j = n_+ |q_+| \cdot v_+ + n_- |q_-| v_-, \quad (3)$$

где  $n_+$  и  $n_-$  – концентрации положительных и отрицательных ионов;  
 $q_+$  и  $q_-$  – заряды ионов;  $v_+$  и  $v_-$  – средние скорости упорядоченного движения ионов.

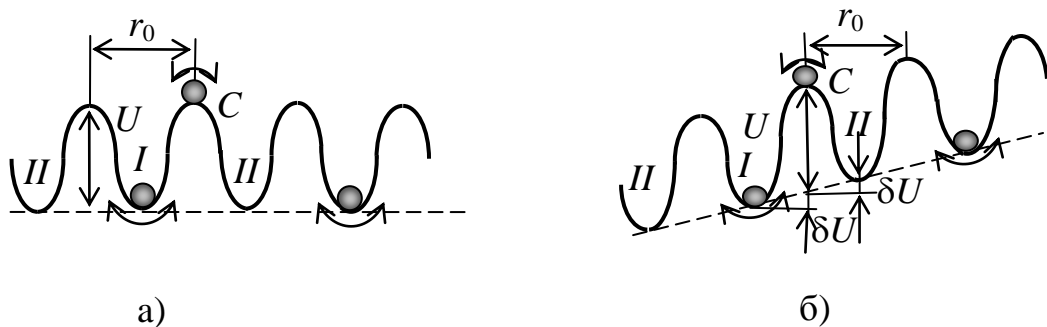


Рис. 1. Энергетический профиль миграции иона при отсутствии

Если молекула распадается на два иона и их заряды равны по модулю ( $|q_+| = |q_-|$ ), то равны и их концентрации  $n_+ = n_-$ , причем

$$n_+ = n_- = \alpha \cdot n, \quad (4)$$

где  $n$  – концентрация молекул растворенного вещества (число молекул растворенного вещества в единице объема раствора).

Средние скорости упорядоченного движения ионов можно выразить через напряженность электрического поля  $E$  в растворе:

$$v_+ = b_+ E \text{ и } v_- = b_- E, \quad (5)$$

где  $b_+$  и  $b_-$  – подвижности ионов, численно равные скоростям ионов при напряженности внешнего электрического поля  $E = 1$  В/м.

В соответствии с соотношениями (4) и (5) уравнение для плотности тока (3) можно записать в векторной форме:

$$\vec{j} = \alpha \cdot n \cdot q (b_+ + b_-) \cdot \vec{E}. \quad (6)$$

Таким образом, плотность тока в электролитах прямо пропорциональна напряженности электрического поля, т.е. закон Ома справедлив и для электролитов.

Сравнивая формулу (3) с дифференциальной формой закона Ома

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (7)$$

находим, что удельная проводимость электролита равна

$$\sigma = \alpha \cdot n \cdot q (b_+ + b_-). \quad (8)$$

Величина, обратная проводимости, есть удельное сопротивление

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\alpha \cdot n \cdot q (b_+ + b_-)}. \quad (9)$$

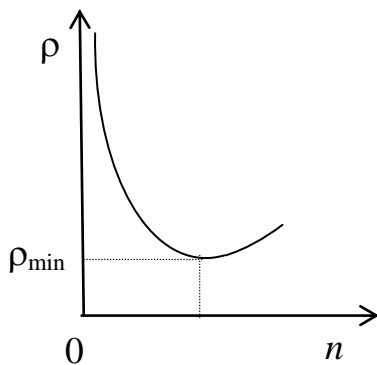


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления электролита от концентрации.

#### Удельное

сопротивление электролита зависит от температуры и концентрации. С повышением температуры удельное сопротивление электролита уменьшается, т.к. увеличиваются коэффициент диссоциации и подвижности ионов  $b_+$  и  $b_-$ .

Зависимость  $\rho$  от концентрации имеет сложный характер (см. рис. 1). При малых концентрациях  $\rho$  убывает с ростом

концентрации ( $\alpha$ ,  $b_+$  и  $b_-$  изменяются слабо и  $\rho \sim \frac{1}{n}$ ). При дальнейшем

увеличении концентрации  $\rho$  достигает минимума, а затем возрастает

вследствие убывания, как коэффициента диссоциации  $\alpha$ , так и подвижности ионов.

В данной работе измеряются удельные сопротивления водных растворов сульфата меди небольших концентраций. Для этого сначала с помощью мостиковой схемы определяют сопротивление столбика электролита, а затем по известной формуле

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (10)$$

вычисляют удельное сопротивление

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (11)$$

Здесь  $l$  – длина столбика жидкости, заключенного между погруженными в нее электродами,  $S$  – поперечное сечение столбика жидкости.

### Описание экспериментальной установки

Измерение удельного сопротивления электролита проводится с использованием мостика Кольрауша, электрическая схема которого представлена на рис. 2.

Установка питается переменным током от звукового генератора и

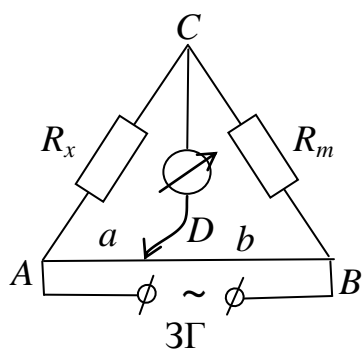


Рис. 2. Схема установки.

состоит из реохорда  $AB$ , магазина сопротивлений  $R_m$ , стеклянной трубки с раствором  $R_x$  и нуль-индикатора, в качестве которого используется осциллограф. Питание мостика переменным током обусловлено тем, что постоянный ток, проходя через электролит, вызывает, с одной стороны, поляризацию электрода и возникновение встречной ЭДС, а с

другой стороны вследствие электролиза – изменение концентрации электролита. Оба эти обстоятельства не позволяют измерять сопротивление электролита на постоянном токе.

Измерение сопротивления при помощи мостика Кольрауша основано на правиле Кирхгофа. В точке  $A$  (см. рис. 2) ток разветвляется и идет по участкам  $ACB$  и  $ADB$ . Обозначим силу тока в ветви  $ACB$  через  $I_1$ , а в ветви  $ADB$  через  $I_2$ . Подбирая магазинное сопротивление  $R_m$  и перемещая скользящий контакт  $D$ , можно найти такую точку реохорда, потенциал которой будет равен потенциалу точки  $C$ . В этом случае ток, протекающий через индикатор, будет равен нулю (мост сбалансирован или уравновешен). Запишем второе правило Кирхгофа для контуров  $ACDA$  и  $CBDC$ :

$$I_1 R_x - I_2 R_a = 0, \quad (12)$$

$$I_1 R_m - I_2 R_b = 0, \quad (13)$$

где  $R_a$  и  $R_b$  – сопротивления плеч реохорда  $AD$  и  $BD$ . Обозначив длины плеч через  $a$  и  $b$ , с учетом уравнения (10) находим:

$$R_x = R_m \cdot \frac{a}{b}. \quad (14)$$

По опытным значениям  $R_m$ ,  $a$  и  $b$  вычисляется сопротивление  $R_x$  столбика электролита заданной длины  $l$  и сечения  $S$ . Искомое удельное сопротивление находят далее по формуле (11).

#### Порядок выполнения работы

1. Наполнить сосуд раствором электролита заданной концентрации.
2. Установить между электродами требуемое расстояние  $l$  (по указанию преподавателя).
3. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 2.
4. Включить звуковой генератор и осциллограф.
5. Установить ползунок  $D$  на середину реохорда ( $a = b$ ) и подобрать магазинное сопротивление  $R_m$  таким, чтобы индикатор показывал отсутствие тока на участке  $CD$  (минимальная амплитуда осциллирующей осциллограммы). Значение  $R_m$  записать в таблицу 1.
6. Увеличить  $R_m$  на 20 Ом и добиться равновесия моста смещением ползунка  $D$ . Значения  $a$ ,  $b$  и  $R_m$  записать в таблицу.

7. Уменьшить  $R_m$  по сравнению с первоначальным значением на 20 Ом и смещением ползунка  $D$  вновь добиться равновесия моста. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

Результаты измерений и вычислений

N п/п	$l$ , см	$R_m$ , Ом	$a$ , см	$b$ , см	$R_x$ , Ом	$\rho$ , Ом·м
Концентрация						
1						
2						
3						
	Среднее значение $\langle \rho \rangle$					
Концентрация						
1						
2						
3						
	Среднее значение $\langle \rho \rangle$					
Концентрация						
1						
2						
3						
	Среднее значение $\langle \rho \rangle$					
Концентрация						
1						
2						
3						
	Среднее значение $\langle \rho \rangle$					
Концентрация						
1						
2						
3						
	Среднее значение $\langle \rho \rangle$					



8. Аналогичные измерения провести для растворов электролита с другими концентрациями (по указанию преподавателя). Результаты измерений записать в таблицу.
9. Отключить от сети звуковой генератор и осциллограф.
10. Для каждой концентрации рассчитать значение  $\rho$ .
11. По средним значениям  $\langle \rho \rangle$  построить график зависимости  $\rho$  от концентрации.
12. Для одной из концентраций электролита вычислить относительную погрешность измерения удельного сопротивления по методике расчета погрешностей косвенных измерений. В рассматриваемом случае формула для расчета  $\varepsilon$  принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S}. \quad (15)$$

Здесь  $\Delta R$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta S$  – погрешности аргументов, включающие в себя систематические и случайные погрешности. При расчетах принять  $\Delta R = 5$  Ом,  $\Delta l = 0,1$  см,  $\Delta S = 0,1$  см<sup>2</sup>.

13. Найти абсолютную погрешность измерения удельного сопротивления  $\Delta \rho = \varepsilon \langle \rho \rangle$ .
14. Окончательный результат представить в виде  $\rho = \langle \rho \rangle \pm \Delta \rho$  Ом·м.

#### Контрольные вопросы

1. Какие вещества относятся к электролитам?
2. В чем суть явления электролитической диссоциации?
3. Какие частицы ответственны за ток в электролитах?
4. Закон Ома для раствора электролитов.
5. Подвижность иона, ее физический смысл, факторы, влияющие на подвижность ионов.
6. Каков механизм ионного транспорта в электролитах?
7. Как рассчитывается удельное сопротивление электролита в данной работе?
8. От каких факторов зависит удельное сопротивление электролитов? Дать

интерпретацию этих зависимостей.

9. Вывести расчетную формулу измерительного мостика Кольрауша.

Литература:

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Учеб. Пособие. В 3-х т. Т.1. Механика. Молекулярная физика. – 3-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит. 1986. 432 с.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Милковская Л.Б. Курс физики. Т. II/ Электричество и магнетизм. 2-е изд., испр. –М.: Высшая школа. 1964. 431с.
3. Френкель Я.И. / Собр. изб. трудов. Т.3. Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Наука. 1959. 460 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: освоить методику измерений с помощью тангенс-буссоли и определить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности: специальное устройство – тангенс-буссоль, источник постоянного тока, амперметр, реостат, двойной переключатель.

### Теоретическое введение

Магнитное поле Земли обусловлено, согласно одной из гипотез, электрическими токами в ядре планеты. Магнитные полюса Земли не совпадают с ее географическими полюсами: северный магнитный полюс расположен на юге в Антарктиде, а южный – на севере в Канаде. Земля представляет собой магнитный диполь, ось которого составляет с осью вращения Земли угол  $11^\circ$ . Пространство, занимаемое магнитным полем Земли, называется магнитосферой. Магнитосфера имеет сложное строение; она сплюснута со стороны Солнца и вытянута с противоположной стороны на десятки тысяч километров. Наблюдаются суточные, вековые изменения магнитного поля, в том числе магнитные бури. Напряженность магнитного поля вблизи магнитных полюсов достигает приблизительно 50 А/м, а на экваторе 30 А/м. В некоторых районах (так называемых районах магнитных аномалий) напряженность резко возрастает; например, в районе Курской магнитной аномалии она достигает 150 А/м.

Магнитное поле Земли обнаруживается с помощью магнитной стрелки, которая устанавливается вдоль магнитных силовых линий. Магнитная стрелка, подвешенная на нити, ориентируется в магнитном поле Земли под некоторым углом к горизонту (рис.1). Вектор напряженности поля  $\vec{H}$  Земли можно

разложить на две составляющие: вертикальную  $\vec{H}_n$  и горизонтальную  $\vec{H}_g$ . Угол между вектором напряженности  $\vec{H}$  и горизонталью называется углом наклоения  $i$ . Для нашей местности  $i = 70^\circ$ .

Горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли можно определить с помощью тангенс-буссоли. Тангенс-буссоль состоит из нескольких витков проволоки, расположенных в вертикальной плоскости. В центре витков находится короткая магнитная стрелка, способная поворачиваться в горизонтальной плоскости. Отклонение магнитной стрелки отсчитывается по горизонтальному лимбу с помощью длинной легкой стрелки-указателя, скрепленной перпендикулярно с магнитной стрелкой.

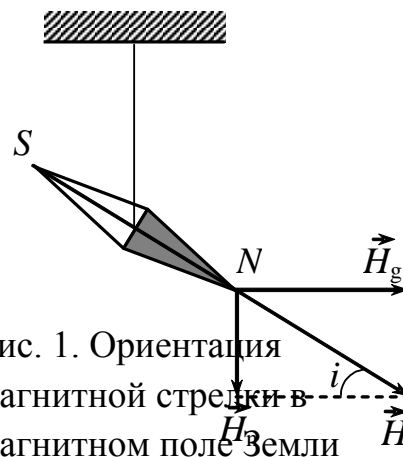


Рис. 1. Ориентация магнитной стрелки в магнитном поле Земли

Перед включением обмотки в цепь тангенс-буссоль устанавливают в плоскости магнитного меридиана Земли. Магнитная стрелка при этом должна находиться в плоскости витков буссоли, стрелка-указатель – на нуле лимба. При пропускании тока по обмотке возникает магнитное поле тока  $\vec{H}_t$ . На рис. 2 показано сечение тангенс-буссоли горизонтальной плоскостью. Направление токов в витках обозначено условно точками и крестиками. Направление вектора  $\vec{H}_t$  перпендикулярно плоскости обмотки и связано с направлением тока в обмотке по правилу правого винта. На магнитную стрелку одновременно действуют два поля: поле Земли и поле тока. В результате стрелка отклоняется от своего первоначального положения на некоторый угол  $\alpha$  и устанавливается вдоль результирующего вектора  $\vec{H}$ .

Модуль напряженности магнитного поля тока в центре кругового витка определяется по формуле

$$H_t = \frac{IN}{2r}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока,  $N$  – количество витков,  $r$  – радиус витков.

Из соотношения катетов прямоугольного треугольника следует, что модуль напряженности магнитного поля Земли равен

$$H_g = H_t \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2)$$

Следовательно, горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли равна

$$H_g = \frac{IN}{2r} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (3)$$

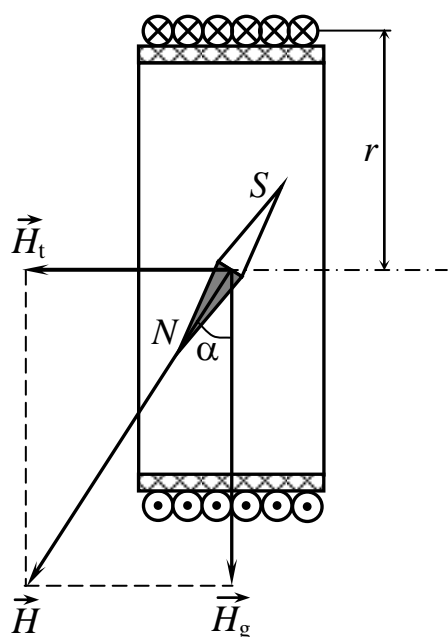


Рис. 2. Векторная диаграмма сложения векторов напряженности магнитного поля Земли  $\vec{H}_g$  и поля тока  $\vec{H}_t$

### Порядок выполнения работы

1. Установить плоскость витков тангенс-буссоли в плоскости магнитного меридиана Земли. Магнитная стрелка при этом должна находиться в плоскости витков буссоли, стрелка-указатель – на нуле лимба.
2. Собрать цепь по схеме на рис. 3, подключив сначала один виток.
3. Включить источник тока. С помощью реостата установить такое значение тока, при котором угол отклонения  $\alpha$  находился бы в интервале  $40 \div 50^\circ$ . Записать в таблицу выбранное число витков, силу тока и угол отклонения магнитной стрелки, отсчитывая его величину дважды по обоим концам стрелки-указателя ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ).
4. С помощью двойного переключателя изменить направление тока в обмотке на противоположное и снова измерить угол отклонения,

поддерживая прежнее значение силы тока. Записать в таблицу величины  $\alpha'_1$  и  $\alpha'_2$ .

5. Уменьшить силу тока до нуля. Выключить источник тока. Подключить два витка обмотки. Повторить действия, указанные в пп.3 и 4.

6. Аналогично проделать опыт с числом витков, равным 3, 4, 5 и 6.

7. Для каждого опыта найти среднее значение угла отклонения  $\alpha_{\text{ср}}$  и по формуле (3) рассчитать горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

8. Рассчитать приближенное значение  $H_g$  и случайную абсолютную погрешность  $\Delta H_{\text{сл}}$  методом Стюдента.

9. Рассчитать систематическую погрешность  $\Delta H_{\text{сист}}$ . Для этого сначала вычислить относительную систематическую погрешность по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta \alpha}{\cos \alpha \sin \alpha}, \quad (4)$$

где  $\Delta r = 0,2$  см,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\Delta \alpha = 1^\circ = \frac{\pi}{180}$  рад. Величину  $\frac{\Delta I}{I}$  найти по классу точности прибора  $\varepsilon_{\text{пред}}$ :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I_{\text{пред}}}{I} \frac{\varepsilon_{\text{пред}}}{100}. \quad (5)$$

Найти абсолютную систематическую погрешность:  $\Delta H_{\text{сист}} = \varepsilon H_g$ .

10. Вычислить полную абсолютную погрешность:

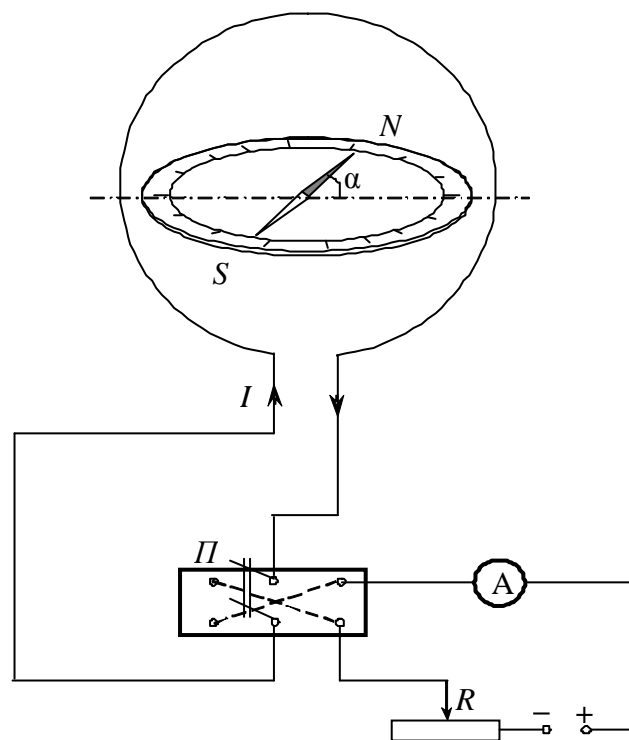


Рис. 3. Электрическая схема установки

$$\Delta H_g = \sqrt{\Delta H_{\text{сл}}^2 + \Delta H_{\text{сист}}^2}. \quad (6)$$

11. Записать окончательный результат. Сформулировать выводы.

Таблица

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	$N$	$I, \text{A}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha'_1$	$\alpha'_2$	$\alpha_{\text{ср}}$	$H_g, \frac{\text{A}}{\text{M}}$

### Контрольные вопросы

1. Чем создается магнитное поле?
2. Как можно обнаружить магнитное поле?
3. Какую форму и направление имеют линии магнитной индукции?  
Приведите примеры магнитных полей.
4. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа.
5. Выведите формулу напряженности магнитного поля в центре кругового тока, пользуясь законом Био-Савара-Лапласа.
6. Как связаны между собой напряженность и индукция магнитного поля?
7. Схематически изобразите магнитное поле Земли.
8. От чего зависит горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли? На каких широтах она максимальна?
9. В чем заключается сущность метода определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс-буссоли?
10. Почему желательно, чтобы магнитная стрелка в тангенс-буссоли была короткой?



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Цель работы: опытным путем найти удельный заряд электрона.

Приборы и принадлежности: электронно-лучевая трубка, соленоид, источники регулируемого постоянного напряжения, амперметр, вольтметр.

## Теоретическое введение

Заряд и масса – важнейшие характеристики элементарной частицы материи. Отношение заряда к массе называется удельным зарядом и иногда рассматривается как особая характеристика частицы. Так, от величины

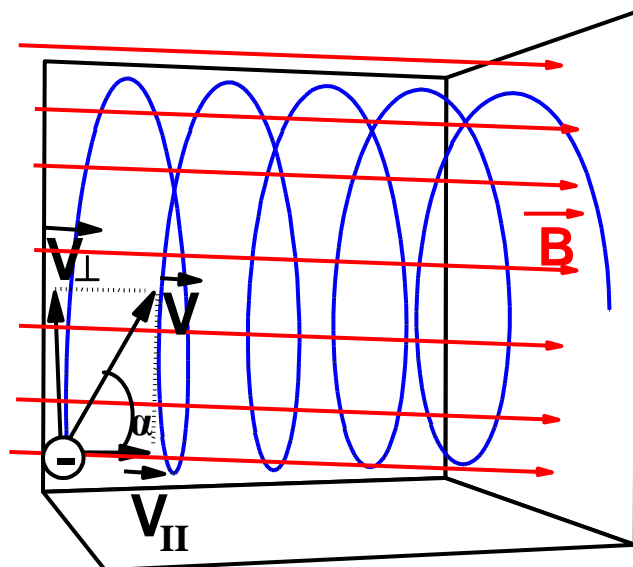


Рис. 1а. Траектория движения  
электрона в однородном  
магнитном поле

удельного заряда зависит вид траектории заряженной частицы в магнитном поле.

Определение удельного заряда электрона  $\frac{e}{m}$  в данной работе основано на специфике характера движения электрона в однородном магнитном поле (рис. 1, 2).

Электроны, испускаемые горячим катодом К (рис. 2),

ускоряются электрическим полем в пространстве между катодом и анодом, имеющим прямоугольное отверстие. Вылетающие из отверстия в аноде электроны образуют пучок, который попадает в магнитное поле соленоида.

На электрон, движущийся со скоростью  $\vec{V}$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , действует так называемая магнитная сила.

$$\vec{F} = -e \cdot \left[ \vec{v} \times \vec{B} \right] \quad (1)$$

Если электрон летит под некоторым углом  $\alpha$  к направлению вектора  $\vec{B}$ , то разложив вектор скорости  $\vec{v}$  на две составляющие по отношению к

$$\text{направлению поля } \vec{v} = v_{\parallel} + v_{\perp}$$

и учитывая, что векторное произведение  $\left[ v_{\parallel} \times \vec{B} \right] = 0$ , получаем

$$\vec{F}_{\perp} = -e \cdot \left[ v_{\perp} \times \vec{B} \right], \quad (2)$$

где  $v_{\perp}$  - составляющая скорости, перпендикулярная вектору  $\vec{B}$ . Таким образом, сила  $\vec{f}_{\perp}$  направлена перпендикулярно к вектору скорости  $\vec{v}$  и не может изменить ее величину, изменяя лишь направление  $\vec{v}$ , а магнитная сила играет роль центростремительной силы, т.е.:

$$F_{\perp} = F_{ц.с.} \quad \text{или} \quad e v_{\perp} B = \frac{m \cdot v_{\perp}^2}{R} \quad (3)$$

Электрон совершает круговое движение, вращаясь со скоростью  $v_{\perp}$ , одновременно продвигаясь вдоль поля с постоянной скоростью  $v_{\parallel}$ . Таким образом, результирующая траектория электрона представляет собой винтовую линию, или спираль, ось которой параллельна вектору  $\vec{B}$  (см. рис. 1а). Проекция траектории электрона на плоскость, перпендикулярную оси спирали, имеет вид окружности (рис.1б). Время одного оборота электрона по винтовой линии (период) равно:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v_{\perp}} \quad (4)$$

Преобразовав уравнение (3), получим:

$$\frac{R}{v_{\perp}} = \frac{1}{\frac{e}{m} B}$$

Подстановка последнего выражения в формулу (4) дает:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{e}{m} B} \quad (5)$$

Таким образом, период вращения электрона не зависит ни от  $v_{\perp}$ , ни от  $R$ , а определяется лишь удельным зарядом частицы  $\frac{e}{m}$  и величиной индукции магнитного поля  $B$ . Это обстоятельство и лежит в основе фокусировки заряженных частиц в магнитном поле. За время  $T$  электроны пройдут вдоль направления поля (вдоль оси соленоида) расстояние (см. рис.1а):

$$l = v_{\parallel} \cdot T = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_{\parallel}}{\frac{e}{m} B} = \frac{2 \cdot \pi \cdot v \cdot \cos \alpha}{\frac{e}{m} B}$$

Так как угол  $\alpha$  на практике мал, то принимая  $\cos \alpha \approx 1$  окончательно получим:

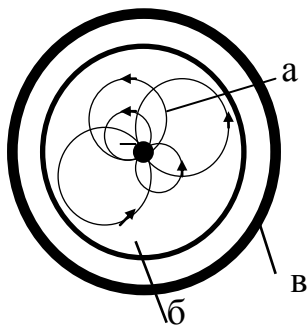


Рис 1б. а - проекция траектории электронов, вылетающих из катода под некоторым углом, б - экран, в - соленоид.

$$l = \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\frac{e}{m} B} \quad (6)$$

Это означает, что электроны с одинаковой по величине скоростью  $v$  за время  $T$  пройдут одинаковое расстояние  $l$ . Сделав один виток по спиральям, диаметры которых определяются углом  $\alpha$ , электроны вновь соберутся в одной точке (см. рис.1б), лежащей на оси, параллельной вектору  $\vec{B}$  и проходящей через центр отверстия в аноде - говорят "произошла фокусировка электронного пучка". Очевидно, что для

фокусировки пучка на экране трубки должно соблюдаться следующее условие:

$$L = k l, \quad (7)$$

где  $L$  - расстояние от анода  $A$  до экрана  $\mathcal{E}$  (рис. 2),  $k$  – кратность фокусировки ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ).

Подставив  $l$  из уравнения (6) в уравнение (7) получим:

$$L = k \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\frac{e}{m} B} \quad (8)$$

Кинетическая энергия электрона равна работе электрического поля по ускорению этого электрона:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U \quad \text{или} \quad v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} U, \quad (9)$$

где  $U$  – разность потенциалов между анодом и катодом.

С целью получения формулы для вычисления удельного заряда  $\frac{e}{m}$ , левую и правую часть уравнения (8) возведем в квадрат и подставим в него  $v^2$  из уравнения (9)

$$L^2 = k^2 \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 2 \cdot \frac{e}{m} U}{\left[ \frac{e}{m} \right]^2 B^2}$$

Откуда:

$$\frac{e}{m} = \frac{k^2 \cdot 8 \cdot \pi^2 \cdot U}{L^2 \cdot B^2} \quad (10)$$

Индукция магнитного поля соленоида:

$$B = \mu_0 \mu n I, \quad (11)$$

где  $n$  – число витков соленоида, приходящихся на единицу его длины,  $I$  - сила тока в соленоиде.

Подставляя  $B$  из уравнения (11) в уравнение (10) и учитывая значения

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad \text{и} \quad \mu = 1 \text{ (вакуум)}$$

получим формулу:

$$\frac{e}{m} = \frac{k^2 \cdot U \cdot 10^{14}}{2 \cdot L^2 \cdot n^2 \cdot I^2} \frac{\text{КЛ}}{\text{кг}} \quad (12)$$

### Описание установки

Электронно-лучевая трубка помещена внутрь соленоида, обмотка которого питается постоянным током (рис.2). Катод трубки подогревается переменным током ( $U = 6,3\text{В}$ ). Напряжение между катодом и анодом регулируется переключателем (“грубо”) и потенциометром (“точно”), расположенным на лицевой панели источника тока. Изменяя величину тока  $I$  в соленоиде при заданном значении ускоряющей разности потенциалов  $U$  можно добиться четкой фокусировки электронного пучка на экране (кратность фокусировки  $k = 1$ ). Дальнейшее увеличение силы тока приведет сначала к дефокусировке, а затем ко вторичной ( $k = 2$ ) фокусировке пучка и т.д. Регулировка силы тока производится с помощью переключателя (“грубо”) и потенциометра (“точно”), расположенных на лицевой панели стабилизатора постоянного тока.

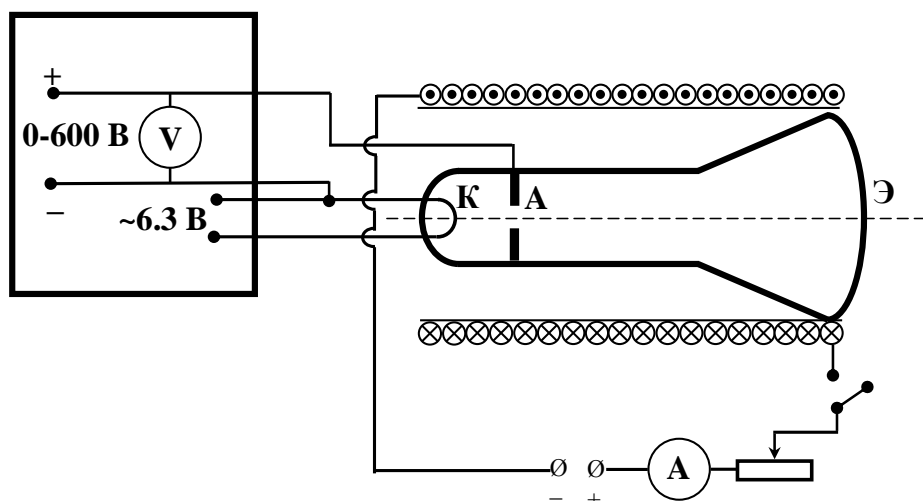


Рис.2 Схема установки для определения удельного заряда электрона

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой. Определить цену деления шкалы вольтметра и амперметра. Включить установку в сеть.
2. После прогрева источников питания (3 мин.) включить ускоряющее напряжение. Записать показания вольтметра.
3. Увеличивая силу тока, начиная с нуля, добиться уменьшения размеров люминесцентного зеленого пятна на экране до минимального (при этом будет достигнута кратность фокусировки  $k = 1$ ). Записать показания амперметра.
4. Увеличивая силу тока в соленоиде, добиться вновь фокусировки ( $k=2$ ) при прежнем ускоряющем напряжении  $U$ . Записать показания амперметра.
5. Установить другое значение ускоряющего напряжения по указанию преподавателя и выполнить действия, указанные в п.п. 3 и 4.
6. Рассчитать удельный заряд электрона по формуле (12) для каждого случая. Величины  $L$  и  $n$  указаны на установке. Результаты расчета записать в таблицу.

Таблица

Результаты измерений и вычислений

$N_{\text{опыта}}$	$U, \text{ В}$	$k$	$I, \text{ А}$	$\frac{e}{m}, \text{ Кл/кг}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

7. Выполнить расчет погрешностей измерений методом Стюдента.
8. Оценить приборную погрешность по классу точности приборов ( $\varepsilon_a$  и  $\varepsilon_v$ ) по формуле:

$$\varepsilon_{\text{приб}} = \frac{I_{\text{пред}}}{I} \cdot \varepsilon_a + \frac{U_{\text{пред}}}{U} \varepsilon_v \quad (13)$$

9. Записать окончательный результат и проанализировать его.

### Контрольные вопросы.

1. Что такое удельный заряд электрона? Чему он равен?
2. От чего зависит величина и направление силы Лоренца?
3. Какова траектория электрона, движущегося в однородном магнитном поле?
4. Выведите формулу для расстояния  $l$ , проходимого электроном вдоль магнитного поля за один оборот по спирали.
5. Выведите расчетную формулу (12).

### Литература:

1. Савельев И. В. Курс общей физики: Учебн. пособие для вузов: в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика - 3-е изд., испр. - М.: Наука, 1988. - 496 с.
2. Калашников С.Г. Электричество. -М.: Наука. 1970.



## СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЖЕЛЕЗА.

Цель работы: установить зависимость магнитной индукции  $\vec{B}$  и магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнитного вещества от напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ .

Приборы и принадлежности: тороид с двумя обмотками и железным сердечником, зеркальный гальванометр, амперметр, выпрямитель, потенциометр, двухполюсные переключатели, нормальный элемент Вестона, конденсатор известной емкости.

### Теоретическое введение.

Все вещества обладают магнитными свойствами и при помещении во внешнее магнитное поле намагничиваются. Суммарное магнитное поле, существующее внутри вещества, внесенного во внешнее магнитное поле, характеризуется вектором магнитной индукции, который  $\vec{B}$  можно представить как векторную сумму:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1, \quad (1)$$

где  $\vec{B}_0$  - индукция внешнего магнитного поля,  $\vec{B}_1$  - индукция наведенного в веществе магнитного поля.

С другой стороны,

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H}_0, \quad (2)$$

где  $\vec{H}_0$  - напряженность внешнего магнитного поля,  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{М}}$  - магнитная постоянная,  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость среды, которая показывает, во сколько раз изменяется магнитное поле вследствие намагничивания среды по сравнению с полем в вакууме.

Произведение  $\mu_0 \mu$  - абсолютная магнитная проницаемость среды.

По своим магнитным свойствам все вещества делятся на три группы:

1. диамагнетики ( $\mu < 1$ )

(Cu, S, Hg, Ag, H<sub>2</sub>O и др.)

2. парамагнетики ( $\mu > 1$ )

(Na, K, Mn, O<sub>2</sub> и др.)

3. ферромагнетики ( $\mu \gg 1, \mu = f(H)$ ) (Fe, Ni, Co и их сплавы)

Магнитная проницаемость ферромагнетиков в значительной степени превосходит проницаемость диа- и парамагнетиков (до  $10^{10}$ ). Например, для кремнистого железа (с содержанием Si 3,3%)  $\mu_{max} = 10^4$ , для пермаллоя (75% Ni, 22% Fe)  $\mu_{max} = 10^5$ .

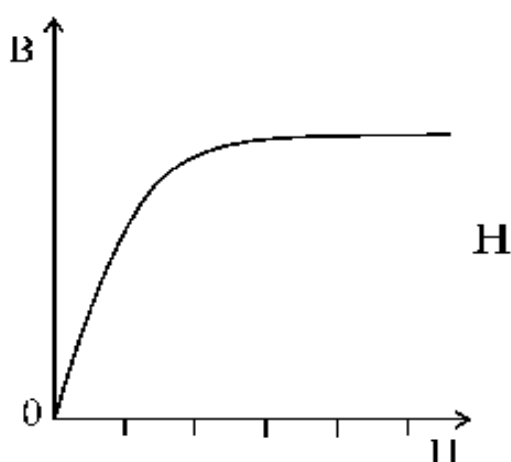


Рис.1. Зависимость индукции магнитного поля ферромагнетика от напряженности внешнего поля

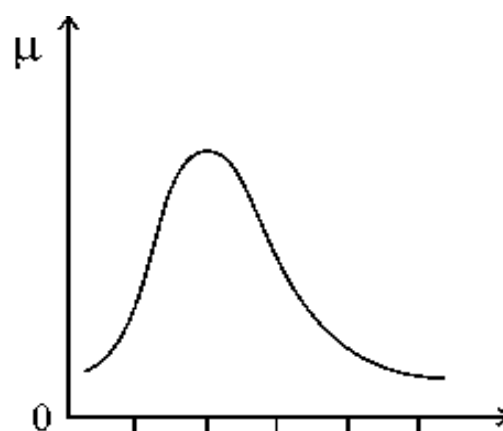
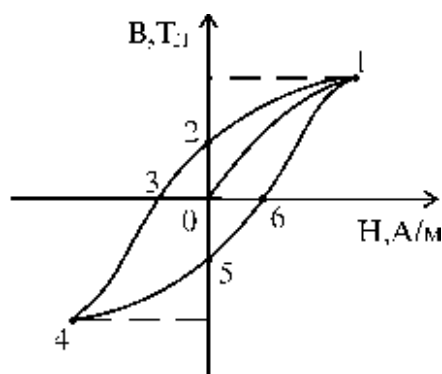


Рис.2. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности внешнего поля

Свойства ферромагнитных веществ связаны с наличием спонтанно (самопроизвольно) намагниченных участков (доменов). В отсутствие внешнего магнитного поля вектора намагниченности доменов ориентированы хаотично. При появлении внешнего магнитного поля и его возрастании происходит перестройка доменов вдоль поля. Состояние насыщения намагничивания означает, что векторы магнитных моментов всех доменов ориентированы вдоль поля. Дальнейший рост величины магнитной индукции  $\vec{B}$  может происходить только за счет роста напряженности  $\vec{H}$  (см. график рис.1.). Зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных веществ от напряженности магнитного поля  $\mu = f(H)$  носит сложный

характер (см. рис.2). Впервые зависимости  $B = f(H)$  и  $\mu = f(H)$  для ферромагнетиков были изучены Л.Г.Столетовым.

Для ферромагнетиков характерно явление магнитного гистерезиса



(отставание изменений индукции  $\vec{B}$  от изменений напряженности  $\vec{H}$ ). На рис. 3 представлена так называемая петля гистерезиса. Участок графика 0-1 – это кривая начального намагничивания.

Точка 1 соответствует насыщению

Рис.3 Петля гистерезиса намагничивания. Если уменьшать

напряженность  $\vec{H}$  до нуля, изменение индукции  $\vec{B}$  происходит по линии 1-2. Величину  $B$ , выражаемую отрезком 0-2, называют остаточной индукцией.

Полного размагничивания образца можно добиться лишь при смене направления внешнего магнитного поля на противоположное (т.3). Величина напряженности поля (0-3) при которой происходит полное размагничивание, называется коэрцитивной силой ( $H_K$ ). При дальнейшем увеличении напряженности (отрезок 3-4) снова наступает насыщение (т.4) и т.д.

Существование остаточной намагниченности у ферромагнетиков делает возможным изготовление постоянных магнитов. С другой стороны, в качестве сердечников электромагнитов могут быть использованы лишь те ферромагнетики, остаточная индукция которых мала.

#### Описание установки.

Для измерения величин  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  составляют электрическую цепь, схема которой изображена на рис.4.

Тороид имеет две обмотки и сердечник из исследуемого ферромагнитного материала. Первичная обмотка с числом витков  $\omega_1$  включается в цепь постоянного тока, источником которого является селеновый выпрямитель (ВС). Напряжение, приложенное к обмотке,

регулируют с помощью потенциометра R. Переключатель  $\Pi_1$  позволяет изменять направление тока в первичной обмотке.

К вторичной обмотке  $\omega_2$  подключен зеркальный гальванометр (Г), представляющий собой прибор магнитоэлектрической системы. Величина смещения светового указателя (“зайчика”) по шкале гальванометра является мерой величины заряда, протекающего через гальванометр.

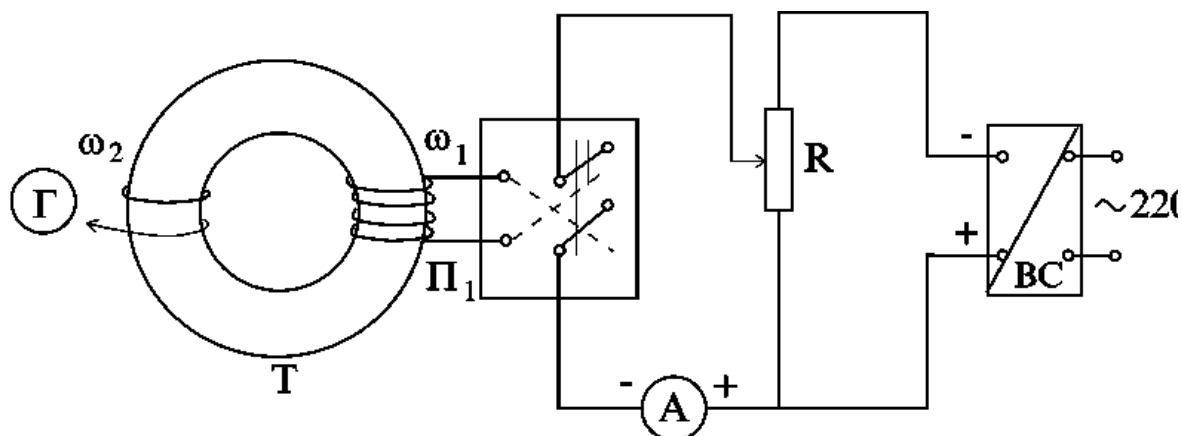


Рис.4. Схема установки

#### Определение напряженности $H$ магнитного поля.

Напряженность магнитного поля в тороиде рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{I \cdot \omega_1}{l}, \quad (3)$$

где  $l$  – длина средней линии тороида,  $I$  – ток в первичной обмотке.

#### Определение магнитной индукции $B$ и магнитной проницаемости $\mu$ .

При пропускании тока  $I$  по первичной обмотке тороида в ферромагнитном сердечнике возникает магнитный поток  $\Phi$ . Изменение направления тока на противоположное вызывает изменение магнитного потока с  $+\Phi$  на  $-\Phi$ , т.е.

$$\Delta \Phi = 2 \Phi = 2 B S, \quad (4)$$

где  $S$  - площадь сечения сердечника.

В результате во вторичной обмотке, соединенной с гальванометром, индуцируется ЭДС, равная

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot \omega_2 \quad (5)$$

$\Delta t$  - время переключения.

Так как цепь гальванометра замкнута, то в ней возникает ток

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t \cdot R} \cdot \omega_2, \quad (6)$$

где  $\Delta q$  – заряд протекающий через гальванометр,  $R$  – сопротивление цепи вторичной обмотки гальванометра.

Из формулы (6) получаем

$$\Delta q = \frac{\Delta\Phi}{R} \cdot \omega_2 = \frac{2 \cdot B \cdot S \cdot \omega_2}{R} \quad (7)$$

Следовательно, величина заряда протекающего во вторичной обмотке при переключении пропорциональна индукции магнитного поля в сердечнике.

С другой стороны, заряд  $\Delta q$  пропорционален отклонению “зайчика” по шкале гальванометра

$$\Delta q = C_B n \quad (8)$$

$C_B$  - баллистическая постоянная гальванометра, равная величине заряда вызывающего отклонение “зайчика” на одно деление,  $n$  - число делений на которое произошло отклонение. Из формул (7) и (8) получаем расчетную формулу для индукции

$$B = \frac{C_3 \cdot n \cdot R}{2 \cdot S \cdot \omega_2} \quad (9)$$

или

$$B = K n \quad (10)$$

$$K = \frac{C_3 \cdot R}{2 \cdot S \cdot \omega_2} \quad (11)$$

Величины  $R$ ,  $S$ ,  $\omega_2$  для данной установки известны. Баллистическая постоянная определяется из эксперимента, описанного ниже.

Таким образом, рассчитав в начале величину  $K$  по формуле (11), определяют магнитную индукцию  $B$  при разных значениях тока в первичной обмотке, т.е. для разных значений напряженностей магнитного поля. Величину магнитной проницаемости исследуемого ферромагнетика находят по формуле:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (12)$$

#### Определение баллистической постоянной гальванометра $C_B$ .

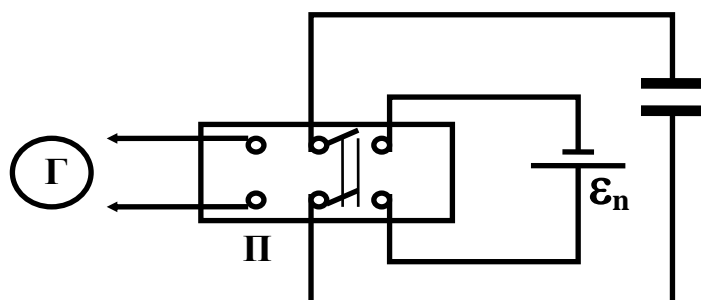


Рис 5. Схема установки

Для измерения  $C_B$  собирают электрическую цепь по схеме, данной на рис.5.

$\mathcal{E}_n$  – нормальный элемент Вестона ( $\mathcal{E}_n=1,0183$  В при  $t=20^\circ\text{C}$ )

$C$  – конденсатор известной емкости.

Первоначально конденсатор замыкают на элемент Вестона. В результате на обкладках конденсатора накапливается электрический заряд

$$\Delta q = C \Delta \varphi = C \mathcal{E}_n \quad (13)$$

Затем переключают конденсатор на гальванометр. Происходит разрядка конденсатора и заряд  $\Delta q$ , проходя через гальванометр, вызывает отклонение “зайчика” на  $n_0$  делений.

Искомая величина  $C_B$  находится по формуле :

$$C_B = \frac{\Delta q}{n_0} = \frac{c \mathcal{E}_n}{n_0} \quad (14)$$

## Порядок выполнения работы.

### I. Определение $C_B$ .

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рис.5.
2. Переключателем П соединить конденсатор  $C$  с нормальным элементом  $\mathcal{E}_n$ .
3. Изменить положение переключателя П, соединив конденсатор с гальванометром. Заметить по шкале максимальное отклонение  $n_0$  (в миллиметрах).
4. Повторить действия, указанные в п.п. 2 и 3 еще два раза.
5. Рассчитать  $C_B$  по формуле (14), взяв среднее значение  $n_0$ .

### II. Снятие кривой намагничивания.

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рис.4.
2. Включить в сеть осветитель гальванометра и выпрямитель ВС.
3. Установить с помощью потенциометра минимальное возможное значение тока  $I$ .
4. С помощью переключателя  $\Pi_1$  изменить направление тока; заметить максимальное отклонение “зайчика” по шкале  $n_1$  (в делениях шкалы).
5. При таком же значении силы тока вновь изменить его направление и заметить максимальное отклонение  $n_2$  по шкале в другую сторону.
6. Установить новое значение тока и повторить действия, указанные в п.п.4 и 5.
7. Измерения провести для 8 - 10 значений силы тока. Полученные данные занести в таблицу.

Таблица

#### Результаты измерений и вычислений

№ п/п	I, А	n, дел			H, А/м	B, Тл	$\mu$
		$n_1$	$n_2$	$n_{CP}$			
1							
2							
3							
...							
10							

8. Выключить из сети выпрямитель и осветитель гальванометра.
9. Рассчитать по формулам (3), (10) и (12) величины  $H$ ,  $B$  и  $\mu$ . Найденные значения занести в таблицу.
10. На листе миллиметровки построить по данным таблицы графики зависимости  $B = f(H)$  и  $\mu = f(H)$ .

#### Контрольные вопросы.

1. Что называется напряженностью  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  индукцией магнитного поля? Что такое магнитный поток  $\Phi$ ?
2. Дайте классификацию веществ по их магнитным свойствам.
3. Каковы характерные особенности ферромагнетиков?
4. Что такое магнитная проницаемость среды?
5. В чем заключается явление магнитного гистерезиса? Изобразите петлю гистерезиса в координатах  $H$ ,  $B$ .
6. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Как используется это явление в данной работе?

#### Литература:

1. Зисман Г. А., Тодес О. М.. Курс общей физики для втузов: в 3 т. Т. 2. - М.: Наука, 1974. - 340 с.
2. Калашников С.Г. Электричество. -М.: Наука. 1970.



