



Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
имени адмирала С. О. МАКАРОВА**

Институт ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Кафедра физики

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

**Методические указания к выполнению
лабораторных работ**

Санкт-Петербург

Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

2017

УДК 537

ББК 22.33

Э91

Э91

Электромагнетизм: метод. указания к выполнению лабораторных работ / сост. Г. И. Горайнов, А. Г. Горобец, С. В. Мульганов, В. И. Пшеницын, В. С. Сказка. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 60 с.

Предназначается для студентов 1- – 2-го курса всех направлений бакалавриата, изучающих дисциплину «Физика» в качестве руководства к выполнению учебных лабораторных работ. Излагается порядок работы студентов в учебной лаборатории механики. Приводится описание работ и методика их выполнения.

Предназначено для студентов всех форм обучения.

Рецензент

Сикарев А. А., д-р техн. наук, профессор (ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»)

© ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2017

© Горайнов Г. И., Горобец А. Г., Мульганов С. В., Пшеницын В. И., Сказка В. С., 2017.

Оглавление

1. Порядок проведения лабораторного практикума	5
2. Вычисление погрешностей результатов измерений	6
3. Графическое представление результатов измерений.....	9
4. Нахождение погрешностей при графическом представлении результатов измерений	11
5. Правила приближённых вычислений и записи результатов измерений	12
6. Греческий алфавит	14
7. Десятичные множители	15
8. Основные единицы международной системы СИ.....	16

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №41

ПРОВЕРКА ЗАКОНА БИО-САВАРА-ЛАПЛАСА.....	17
А) ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРЯМОГО ТОКА.....	18
Б) ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КРУГОВОГО ТОКА	20

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №42

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....	23
--	----

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА	26
А) ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	29
Б) ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	31

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №44

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ, ОБЛАДАЮЩИХ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ	33
А) НАБЛЮДЕНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА.....	35

Б) ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	38
---	----

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №45

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ СТОЛЕТОВА	42
---	----

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 46

СЛОЖЕНИЕ ВЗАИМНО-ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ. ИЗУЧЕНИЕ ФИГУР ЛИССАЖУ.	47
--	----

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 47

ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ	51
---	----

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 48

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ И ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ДЛЯ НЕГО	55
---	----

1. Порядок проведения лабораторного практикума

В течение семестра, в зависимости от специальности и числа планируемых часов, каждым студентом выполняется от 6 до 12 лабораторных работ. За время одного занятия (2 часа) выполняется не более одной работы. Последовательность выполнения работ определяется специальным графиком, имеющимся в лаборатории.

Чтобы быть допущенным к выполнению очередной лабораторной работы, студент должен иметь:

- готовый отчёт по предыдущей работе;
- заготовку чистовика отчёта текущей лабораторной работы;
- заготовку черновика текущей работы.

Отчёт о лабораторной работе выполняется на отдельных (сдвоенных) тетрадных листах в клеточку. Требования к содержанию отчёта, образец титульного листа и пример готового отчёта приведены далее.

Черновики лабораторных работ обязательно выполняются в отдельной ученической тетради в клеточку (лабораторный журнал). Заготовка черновика включает расчётные формулы, таблицы для занесения результатов наблюдений и расчётов, формулы оценки погрешностей эксперимента. Такая тетрадь является лабораторным журналом, единым для выполнения всех работ в данной лаборатории.

После проведения измерений, предварительной обработки данных и оценки конечного результата, черновик предъявляется преподавателю. Если результат верен, преподаватель подписывает черновик, фиксируя этим выполнение студентом лабораторной работы. Окончательное оформление отчёта выполняется студентами во внеурочное время.

Защита лабораторных работ осуществляется на специальных занятиях и во время зачёта. Для успешной защиты работы студенту необходимо:

- иметь выполненный в соответствии с требованиями отчёт и лабораторный журнал, в котором зафиксировано выполнение работы (имеется подписанный преподавателем черновик);
- знать теоретический материал, относящийся к пунктам 2 и 3 содержания отчёта;
- разбираться в сути используемого метода измерений;
- уметь объяснить отдельные результаты и закономерности;

– уметь оценивать погрешности величин, получаемых в ходе прямых или косвенных измерений.

По усмотрению преподавателя защита ряда работ может быть организована в форме коллоквиума, что потребует от студента знания дополнительного материала, указанного преподавателем.

Одно из занятий в лаборатории отводится для проведения контрольной работы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Основные понятия и закономерности.
3. Идея метода измерений и суть предлагаемой методики.
4. Таблицы экспериментальных данных и результаты расчетов.
5. Графики (**на миллиметровой бумаге!**).
6. Оценка погрешности измерений (указать способ оценки погрешностей, привести оценочные формулы).
7. Запись окончательного результата с учетом погрешностей измерений.

Отчёт обязательно должен содержать все пункты в указанной последовательности. При отсутствии материала к какому-либо пункту, напротив соответствующего номера ставится прочерк.

2. Вычисление погрешностей результатов измерений

Измерение — это сравнение измеряемой величины с другой величиной, принятой за единицу измерения. Большинство физических величин обладают **истинным значением**, которое идеально отражает свойства измеряемого объекта.

Измерения бывают **прямые** и **косвенные**. При **прямых** измерениях определяемая величина непосредственно сравнивается с единицей измерения (определение **длины** предмета, его **массы** и **времени** протекания процесса). При **косвенных** измерениях измеряемая величина **вычисляется** из результатов прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной некоторой функциональной зависимостью (измерение скорости, плотности тела и т.д.).

Все физические эксперименты производятся с некоторой точностью, т.е. всегда имеется **погрешность** измерений физических величин. Погреш-

ностью называется **отклонение** результатов измерений от истинного значения измеряемой величины.

Погрешности подразделяются следующим образом:

1. Систематические, обусловленные особенностями измерительных приборов и условий измерения. В принципе эти погрешности могут быть устранены усовершенствованием измерительных приборов и методов измерений.

2. Случайные, которые изменяются случайным образом при проведении серии повторных измерений одной и той же величины. Случайные погрешности вызываются как **объективными**, так и **субъективными** причинами. Случайные погрешности, существенно превышающие ожидаемую для данного измерения величину, называются **промахами**. Обычно промахи объясняются невнимательностью экспериментатора и должны быть исключены из рассмотрения.

3. Инструментальные погрешности, зависящие от ограниченной точности измерительного прибора.

Наиболее простая процедура нахождения случайных погрешностей **прямого измерения** заключается в следующем.

Производится ряд единичных измерений значения некоторой физической величины X (обычно делается нечётное число измерений): $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$, всего N измерений. Вычисляется средняя арифметическая величина X_{cp} :

$$X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}. \quad (1)$$

При достаточно большом числе измерений N величина X_{cp} принимается за истинное значение измеряемой величины.

Абсолютной погрешностью прямого единичного измерения называется величина:

$$\Delta X_i = |X_{cp} - X_i|. \quad (2)$$

Производится вычисление погрешностей всех N единичных измерений: $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \dots, \Delta X_N$. Вычисляется средняя арифметическая величина ΔX_{cp} :

$$\Delta X_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta X_i}{N}. \quad (3)$$

Найденное экспериментально значение измеряемой величины X записывается в виде:

$$X = X_{\text{ср}} \pm \Delta X_{\text{ср}}. \quad (4)$$

Относительной погрешностью измеряемой величины является отношение абсолютной погрешности к значению самой величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta X_{\text{ср}}}{X_{\text{ср}}}. \quad (5)$$

При **косвенных** измерениях производится определение (путём **прямых** измерений) значений ряда физических величин, **входящих в формулу** для расчёта, находятся их **средние** значения и средние **абсолютные и относительные** погрешности измерений.

Определение **погрешностей косвенных измерений** производится в соответствии со следующей процедурой. Пусть измеряемая величина X вычисляется по формуле:

$$X = \frac{\pi \cdot A \cdot B}{C^2}. \quad (6)$$

Значения физических величин A , B , C находятся путём **прямых** измерений. Следовательно, для них известны средние значения и средние погрешности измерений, как абсолютные, так и относительные.

1. Логарифмируется формула, по которой вычисляется значение величины X :

$$\ln X = \ln 2 + \ln \pi + \ln A + \ln B - 2 \ln C. \quad (7)$$

2. Полученное выражение дифференцируется:

$$\frac{dX}{X} = \frac{dA}{A} + \frac{dB}{B} - 2 \times \frac{dC}{C}. \quad (8)$$

3. Знаки дифференциалов d в этой формуле заменяются знаками конечных приращений Δ , а все знаки “-” заменяются на “+”:

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + 2 \cdot \frac{\Delta C}{C}. \quad (9)$$

Выражение (9) представляет собой относительную погрешность косвенных измерений. Для определения абсолютной погрешности следует значение относительной погрешности умножить на $X_{\text{ср}}$.

Погрешность серии косвенных измерений величины X можно определить (на примере формулы 6) в соответствии с процедурой, указанной в табл. 1.

Таблица 1

№	A	B	C	X	ΔX
1	A_1	B_1	C_1	X_1	ΔX_1
2	A_2	B_2	C_2	X_2	ΔX_2
3	A_3	B_3	C_3	X_3	ΔX_3
$X_{\text{ср}}$	$\Delta X_{\text{ср}}$				

По результатам трёх прямых измерений величин A , B , C вычисляются три значения X . Далее находится среднее значение $X_{\text{ср}}$, погрешность каждого измерения ΔX и среднее значение погрешности измерений $\Delta X_{\text{ср}}$.

Если точность измерительного прибора недостаточна для определения погрешности прямых измерений, используется инструментальная погрешность.

Точность измерительного прибора определяется значением минимального деления его измерительной шкалы.

Инструментальная погрешность измерительного прибора равна половине его точности, т.е. половине минимального деления шкалы.

3. Графическое представление результатов измерений

Представление результатов измерений в виде графиков даёт наглядное представление о зависимости одной физической величины (Y) от другой (X). Во многих случаях такая зависимость изображается в виде:

$$Y = A + B \cdot X, \quad (10)$$

где **A** и **B** — некоторые физические величины, подлежащие определению при измерении зависимости **Y** от **X**.

Для построения графиков используют **миллиметровую бумагу**. Значения независимой переменной **X** откладываются по оси абсцисс (горизонтальной оси), значения зависимой величины **Y** — по оси ординат (вертикальной оси). Обычно оси располагают вдоль толстых линий на бумаге. По осям ординат выбирают масштабы измерения так, чтобы точность отсчёта величин **X** и **Y** по графику соответствовала точности отсчёта их измеренных значений. Масштабы выбирают так, чтобы единица масштаба была кратна десяти, пяти или двум клеткам бумаги. На концах осей надписывают **обозначения** измеряемых физических величин и отмечают **наименования** их единиц измерения. График не должен быть растянут или сжат вдоль осей координат, а экспериментальные точки и проведённая через них кривая должны располагаться по возможности на наибольшей площади. Если откладываемая на оси величина изменяется в пределах, далёких от нулевого значения, в начале координат графика помещают число, близкое к наименьшему значению, определённому экспериментально. На осях координат **не допускается** обозначение промежуточных данных, а помещаются только числа, соответствующие выбранному масштабу.

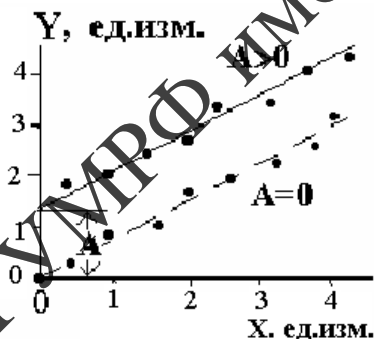


Рис. 1

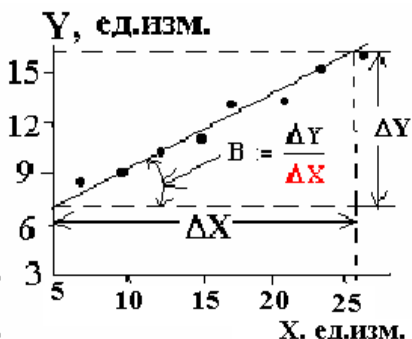


Рис. 2

Прямая линия проводится через экспериментальные точки наилучшим образом в соответствии с теоретическим уравнением (10) так, чтобы точки равномерно группировались выше и ниже прямой. Способы получения численных значений параметров **A** и **B** понятны из рассмотрения рис. 1 и

рис. 2. Угловой коэффициент **В** определяется так же, как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс. Угловой коэффициент **В** и отрезок **А**, отсекаемый прямой на оси ординат, в каждом конкретном случае имеют определённый физический смысл и, как правило, имеют размерность.

4. Нахождение погрешностей при графическом представлении результатов

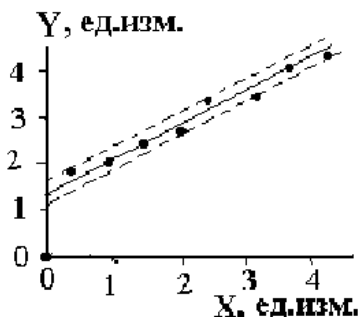


Рис. 3



Рис. 4

Для нахождения погрешности ΔA измерений отрезка **А**, отсекаемого прямой на оси ординат, параллельно проведённой прямой проводятся две дополнительные прямые (пунктиры на рис.3). Одна проводится так, чтобы все экспериментальные точки лежали ниже прямой, другая — так, чтобы все точки лежали выше прямой. Отрезок ΔY , отсекаемый этими пунктирными линиями на оси ординат, равен удвоенной погрешности величины **А**:

$$\Delta A = \frac{\Delta Y}{2}. \quad (11)$$

Для нахождения погрешности ΔB измерений углового коэффициента **В**, участок оси абсцисс, на котором расположены экспериментальные точки, условно делится на три участка (рис. 4). Вначале экспериментальная прямая поворачивается так, чтобы на левом участке экспериментальные точки лежали выше прямой, а на правом — ниже прямой (случай 1 - 1 на рис. 4). Затем эта прямая поворачивается таким образом, чтобы на левом участке экспериментальные точки лежали ниже прямой, а на правом — выше неё (случай 2 — 2 на рис. 4). Для каждой из пунктирных прямых по общим правилам вычисляется угловой коэффициент **В**. Такое построение

даёт три значения **B**, откуда вычисляется среднее значение углового коэффициента **B_{ср}** и среднее значение погрешности измерений **ΔB_{ср}**.

5. Правила приближённых вычислений и записи результатов измерений

1. В записи любого числа все цифры, кроме нулей, стоящих перед первой, отличной от нуля цифрой, называются **значащими цифрами**. Например, в числе **0,00170** три значащие цифры.

2. Результаты расчётов, как правило, округляются до разумных пределов. Округление достигается простым отбрасыванием цифр, если первая из отбрасываемых цифр меньше пяти. Например, число **22468** округляется до **22000** (записывается как **22·10³**). Если же первая из отбрасываемых цифр больше пяти, то стоящая перед ней цифра увеличивается на единицу. Например, **34523** округляется до **35000** (**35·10³**).

3. При сложении и вычитании округление результата производится по правилам 1 и 2. В результате следует сохранять столько десятичных разрядов, сколько их в наименее точном числе:

$$23,2 + 0,442 + 7,247 \approx 30,9. \quad (12)$$

4. При умножении и делении в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет сомножитель с наименьшим числом значащих цифр:

$$\begin{aligned} 30,9 \cdot 1,8364 &\approx 56,7; \\ 454 : 75 &\approx 6,1. \end{aligned} \quad (13)$$

5. При возведении в степень в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько имеет возводимое в степень число:

$$(11,38)^2 = 129,5044 \approx 129,5. \quad (14)$$

6. При извлечении корней в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное выражение:

$$\sqrt{2,97} = 1,724 \approx 1,72. \quad (15)$$

7. При нахождении логарифма приближённого числа следует брать столько знаков, сколько их содержит данное число:

$$\lg 77,23 = 2,8878 \approx 2,888. \quad (16)$$

8. При вычислении промежуточных результатов следует брать на одну цифру больше, чем указано в округлении при выполнении математических действий над числами.

9. При вычислении средней погрешности измерений последняя округляется до одной значащей цифры (всегда с избытком). Среднее значение измеряемой физической величины округляется до разряда, в котором стоит округлённое число абсолютной погрешности:

$$\begin{aligned} Y &= 123357 \pm 678 \text{ (до округления);} \\ Y &= 123400 \pm 700 \text{ (после округления).} \end{aligned} \quad (17)$$

Записывается как $(1234 \pm 7) \cdot 10^2$. Погрешность всегда округляется в большую сторону:

$$\begin{aligned} Y &= 237,47 \pm 0,16 \text{ (до округления);} \\ Y &= 237,5 \pm 0,2 \text{ (после округления)} \end{aligned} \quad (18)$$

10. Степенной множитель 10^n следует всегда **выносить за скобки** при записи окончательного результата:

$$\begin{aligned} Y &= 2587517 \pm 18195 = 2,587517 \cdot 10^6 \pm 0,18195 \cdot 10^6 = (2,6 \pm 0,2) \cdot 10^6; \\ Y &= 0,00175 \pm 0,00023 = 0,0018 \pm 0,0002 = (1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (19)$$

В записи окончательного результата **необходимо указывать единицы измерения** исследуемой величины.

$$Y = (Y_{\text{cp}} \pm \Delta Y_{\text{cp}}) \text{ ед. изм.} \quad (20)$$

6. Греческий алфавит

Α	α	alpha	альфа
Β	β	beta	бета
Γ	γ	gamma	гамма
Δ	δ	delta	дельта
Ε	ε	epsilon	эпсилон
Ζ	ζ	zeta	дзета
Η	η	eta	эта
Θ	θ	theta	тета
Ι	ί	iota	йота
Κ	κ	kappa	каппа
Λ	λ	lambda	ламбда
Μ	μ	mu	мю
Ν	ν	nu	ню
Ξ	ξ	xi	кси
Ο	ο	omicron	омикрон
Π	π	pi	пи
Ρ	ρ	rho	ро
Σ	σ	sigma	сигма
Τ	τ	tau	тау
Υ	υ	upsilon	ипсилон
Φ	φ	phi	фи
Χ	χ	chi	хи
Ψ	ψ	psi	пси
Ω	ω	omega	омега

7. Десятичные множители

Десятичный множитель	Приставка		Обозначение	
	русская	международная	русское	международное
10^1	дека	deca	да	da
10^2	гекто	hecto	г	h
10^3	кило	kilo	к	k
10^6	мега	Mega	М	M
10^9	гига	Giga	Г	G
10^{12}	тера	Tera	Т	T
10^{15}	пета	Peta	П	P
10^{18}	экса	Exa	Э	E
10^{21}	зетта	Zetta	З	Z
10^{24}	иотта	Yotta	И	Y

Десятичный множитель	Приставка		Обозначение	
	русская	международная	русское	международное
10^{-1}	деци	deci	д	d
10^{-2}	санти	centi	с	c
10^{-3}	милли	milli	м	m
10^{-6}	микро	micro	мк	μ
10^{-9}	нано	nano	н	n
10^{-12}	пико	pico	п	p
10^{-15}	фемто	femto	ф	f
10^{-18}	атто	atto	а	a
10^{-21}	zepto	zepto	з	z
10^{-24}	иокто	yocto	и	y

8. Основные единицы международной системы СИ

Величина	Наименование единицы СИ	Обозначение
Длина	Метр	м
Масса*	Килограмм	кг
Время	Секунда	с
Электрический ток	Ампер	А
Термодинамическая температура	Кельвин	К
Количество вещества	Моль	моль
Сила света	Кандела	кд

Лабораторная работа № 41

ПРОВЕРКА ЗАКОНА БИО–САВАРА–ЛАПЛАСА

Магнитное поле создаётся движением электрических зарядов (протеканием токов по проводам). Силовой характеристикой магнитного поля является векторная величина, называемая магнитной индукцией $\vec{B}$. Модуль и направление вектора $\vec{B}$ в данной точке зависит от значения и конфигурации токов — источников магнитного поля.

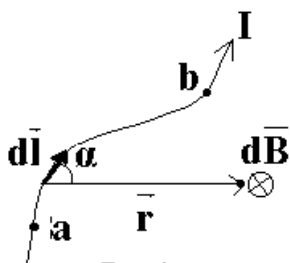


Рис.1

Нахождение вектора $\vec{B}$ производится согласно закону Био-Савара-Лапласа. Отрезок провода $d\vec{l}$, по которому протекает ток I , создаёт в точке на расстоянии r элементарное поле $d\vec{B}$, направление которого определяется правилом правого винта. Величина вектора $d\vec{B}$ определяется выражением:

$$d\vec{B} = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot \left[\frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \right]}{4\pi} \quad (1)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнитная постоянная, I — ток в проводе. Индукция магнитного поля $\vec{B}$, создаваемая конечным участком провода от точки a до точки b , находится согласно принципу суперпозиции полей:

$$\vec{B} = \int_a^b \mu_0 \cdot I \cdot \left[\frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \right] \quad (2)$$

Вынося все постоянные величины из-под знака интеграла, получаем:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \int_a^b \left[\frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \right] \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) позволяют в ряде случаев сравнительно легко рассчитывать величину индукции $\vec{B}$ магнитного поля. Направление вектора $\vec{B}$ в любом случае определяется по правилу правого винта.

А) ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРЯМОГО ТОКА

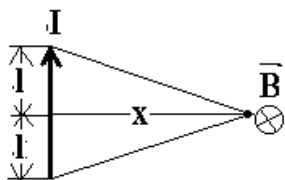


Рис. 2

Применение формулы (3) к задаче нахождения магнитного поля создаваемого прямолинейным проводником длины $2l$, по которому протекает ток I (рис. 2), приводит к выражению:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{l}{x \cdot \sqrt{x^2 + l^2}}. \quad (4)$$

Точка, в которой измеряется величина B , находится на перпендикуляре к середине провода. На рис. 2 вектор $\vec{B}$ направлен в плоскость чертежа.

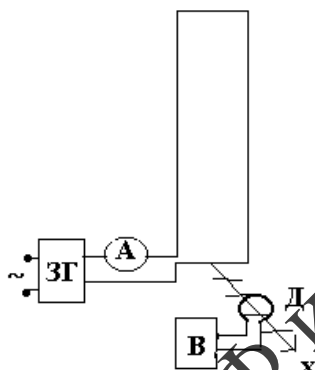


Рис. 3

Магнитное поле создаётся с помощью вытянутой прямоугольной рамки с током, закреплённой на стене. Параметры рамки выбраны так, чтобы на исследуемом участке максимально ослабить влияние полей всех её сторон, кроме нижнего участка длиной $2l$. Рамка питается переменным током частоты ~ 5 кГц от звукового генератора ЗГ. В схему установки может быть включён амперметр А для измерения тока в рамке.

Индукция B магнитного поля измеряется вдоль направления x в плоскости стола, на котором расположена установка. Расстояние x от рамки с током измеряется с помощью линейки.

Вектор $\vec{B}$ перпендикулярен поверхности стола. Переменный синусоидальный ток, протекающий по рамке, создаёт переменное магнитное поле. Величина поля измеряется с помощью переносного проволочного датчика Д, представляющего собой катушку, плоскость витков которой располагается перпендикулярно вектору $\vec{B}$. Согласно закону электромагнитной ин-

дукции Фарадея, переменное магнитное поле индуцирует в катушке ЭДС индукции:

$$E_{\text{и}} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{dB}{dt} \cdot S. \quad (5)$$

Из (5) следует, что индуцируемая ЭДС пропорциональна индукции **В** магнитного поля. Величина ЭДС измеряется вольтметром **В**.

Такая схема регистрации индукции магнитного поля позволяет изучать зависимость **В** от **х** в условных единицах шкалы вольтметра, пропорциональных индукции.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включите в сеть звуковой генератор и измерительный вольтметр. Установите на **ЗГ** частоту ~5 кГц.

2. Поместите датчик **Д** на расстоянии 1 см от рамки с током. Отрегулируйте выходное напряжение звукового генератора так, чтобы стрелка вольтметра отклонилась на всю шкалу (10 условных делений).

3. Перемещая датчик вдоль направления **х**, измеряйте показания вольтметра на расстояниях 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 см от рамки. Результаты измерений занесите в табл. 1.

4. При наличии в схеме установки амперметра, установите датчик на расстоянии **х** = 5 см от рамки и отрегулируйте выходное напряжение **ЗГ** таким образом, чтобы стрелка вольтметра отклонилась на всю шкалу (10 условных делений). Определите ток **І** через рамку и запишите его величину в табл. 2. Регулируйте выходное напряжение **ЗГ**, последовательно уменьшая ток **І** через рамку и отмечайте значения тока, при которых индукция **В** в данной точке будет соответствовать 9, 8, и т. д. условным делениям шкалы вольтметра. Все данные заносите в табл. 2.

5. По данным табл. 1 постройте график зависимости индукции магнитного поля **В** в условных единицах делений шкалы вольтметра (ордината) от величины:

$$\frac{1}{x \cdot \sqrt{x^2 + l^2}} \text{ (абсцисса)}. \quad (6)$$

6. По данным табл. 2 постройте график зависимости индукции **В** (в условных единицах) от силы тока **І** в проводнике:

$$B(\text{усл.ед.}) = f(I). \quad (7)$$

7. Сделайте заключение о справедливости закона Био–Савара–Лапласа для случая магнитного поля прямого тока.

Таблица 1

$I = \dots\dots \text{см}$		
$x, \text{ см}$	$B (\text{усл.ед.})$	$I/[x \cdot (x^2 + I^2)^{1/2}]$

Таблица 2

$x = 5 \text{ см}$	
$I, \text{ А}$	$B (\text{усл.ед.})$

Б) ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КРУГОВОГО ТОКА

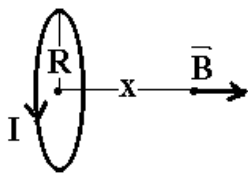


Рис.4

В работе исследуется магнитное поле, создаваемое круговым током радиуса R в зависимости от расстояния x до плоскости витка вдоль его оси. Решение уравнения (2) для данного случая приводит к формуле (8).

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (8)$$

Направление вектора $\vec{B}$ определяется по правилу правого винта. В данном случае вектор магнитной индукции направлен вправо от плоскости витка с током.

Описание установки

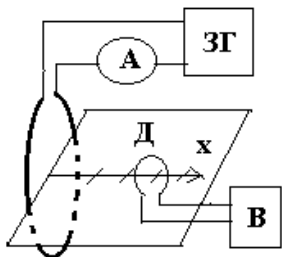


Рис.5

Магнитное поле создаётся при помощи кругового витка, закреплённого перпендикулярно поверхности стола (рис. 5). Круговой ток питается переменным напряжением частоты ~ 5 кГц от звукового генератора ЗГ. В цепи питания витка может находиться амперметр А, измеряющий ток, протекающий по витку. Переменный синусоидальный ток, протекающий по витку, создаёт переменное магнитное поле В. Это поле регистрируется аналогично методике, изложенной в работе №31-А, с помощью датчика

(катушки) Д, в котором индуцируется ЭДС, пропорциональная величине индукции магнитного поля. Значение ЭДС индукции регистрируется вольтметром В. Плоскость катушки датчика ориентируется параллельно плоскости витка. Расстояние от витка до датчика измеряется по линейке, закреплённой на столе.

Порядок выполнения работы

1. Включите в сеть звуковой генератор и вольтметр. Установите на ЗГ частоту ~ 5 кГц.
2. Расположите катушку датчика Д на расстоянии 1 см от плоскости витка. Регулируя выходное напряжение звукового генератора, установите стрелку вольтметра на максимальное отклонение (10 условных делений шкалы). Отклонение стрелки гальванометра пропорционально индукции В магнитного поля в данной точке в условных единицах.
3. Перемещая катушку датчика вдоль оси витка на расстояния от $x = 1$ см через 1 см до $x = 5$ см и далее через 5 см до значений $x = 30$ см, заносите в табл. 3 величину индукции магнитного поля В в условных единицах (делениях шкалы вольтметра).
4. При наличии в установке амперметра А, расположите датчик Д на расстоянии 5 см от витка с током и, регулируя выходное напряжение ЗГ, установите на вольтметре максимальное отклонение стрелки. Отметьте ток I, протекающий по витку, и запишите его значение в табл. 4, а также вели-

чину индукции **B** магнитного поля в условных единицах (10 усл. ед.), соответствующее этому току.

5. Регулируя выходное напряжение **ЗГ**, последовательно уменьшайте ток **I** через виток и отмечайте значения тока, при которых индукция **B** в данной точке будет соответствовать 9, 8 и т.д. условным делениям шкалы вольтметра. Все данные заносите в табл. 4.

6. По данным табл. 3 постройте график зависимости индукции магнитного поля **B** (ордината) в условных единицах делений шкалы вольтметра от величины:

$$\frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} (\text{абсцисса}). \quad (9)$$

7. По данным табл. 4 постройте график зависимости индукции **B** от силы тока в контуре:

$$B(\text{усл.ед.}) = f(I). \quad (10)$$

8. Сделайте заключение о справедливости закона Био–Савара–Лапласа в случае магнитного поля кругового тока.

Таблица 3

R=см		
x, см	$R^2/(R^2 + x^2)^{3/2}$	B (усл.ед.)

Таблица 4

x=5 см	
I, A	B (усл.ед.)

Лабораторная работа № 42 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Земной шар представляет собой своеобразный магнит, линии магнитной индукции которого в каждой точке Земли направлены под некоторым углом к горизонту. Этот угол называется **углом склонения**. На экваторе угол склонения равен нулю. Это означает, что вектор магнитной индукции $\vec{B}$ на экваторе параллелен поверхности Земли. Во всех остальных точках вектор магнитной индукции можно разложить на две составляющие — параллельную горизонту, или **горизонтальную составляющую** $\vec{B}_g$ и перпендикулярную ей **вертикальную составляющую** $\vec{B}_v$:

$$\vec{B} = \vec{B}_v + \vec{B}_g. \quad (1)$$

Горизонтально расположенная магнитная стрелка ориентируется вдоль горизонтальной составляющей $\vec{B}_g$ земного магнитного поля, т.е. вдоль магнитного меридиана.

Целью работы является определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Описание установки и методики определения горизонтальной составляющей B_g

Схема экспериментальной установки для определения B_g представлена на рис. 1.

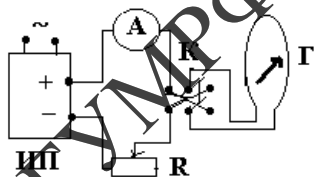


Рис.1

Она включает источник питания постоянного тока **ИП**, амперметр **А**, магазин сопротивлений **R**, с помощью которого можно менять ток в цепи, переключатель **K**, с помощью которого можно менять направление тока в цепи, и **тангенс-гальванометр Г**. Тангенс — гальванометр представляет собой вертикально распо-

ложенную проводящую катушку радиуса r , имеющую N витков. В центре катушки помещается компас. Магнитная стрелка компаса может вращаться

только в горизонтальной плоскости. Поэтому она реагирует на горизонтальную составляющую магнитного поля в центре катушки.

При выключенном источнике тока **III**, т.е. в отсутствие внешнего магнитного поля, стрелка компаса располагается вдоль магнитного меридиана. Установим плоскость катушки тангенс-гальванометра также вдоль магнитного меридиана, т.е. параллельно магнитной стрелке.

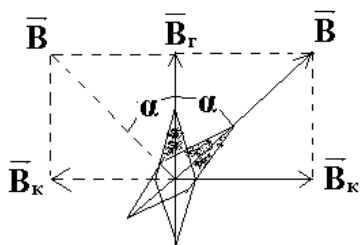


Рис.2

Если теперь через катушку пропустить электрический ток, то в центре катушки векторы магнитных полей катушки $\vec{B}_K$ и Земли $\vec{B}_r$ будут перпендикулярны друг другу (рис. 2). Магнитная стрелка отклонится от своего первоначального положения и установится в направлении результирующего вектора $\vec{B} = \vec{B}_K + \vec{B}_r$. Из рис. 2 видно, что индукции $\vec{B}_K$ и $\vec{B}_r$ связаны между собой соотношением:

$$\frac{B_r}{B_K} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Значение индукции поля катушки в её центре, т.е. в месте расположения магнитной стрелки, находится по формуле для магнитного поля кругового тока:

$$B_K = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2 \cdot r}. \quad (3)$$

Из формул (2) и (3) следует:

$$B_r = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4)$$

Определив угол α , на который отклонится стрелка от направления меридиана при токе I через катушку, и зная параметры катушки тангенс-гальванометра, по формуле (4) можно вычислить величину горизонтальной составляющей B_r магнитного поля Земли.

Если изменить с помощью переключателя **K** направление тока в катушке тангенс-гальванометра, не меняя его величины I , стрелка компаса

отклонится на такой же угол α в противоположную сторону по отношению к меридиану (рис. 2).

Порядок выполнения работы

1. Соберите схему установки согласно рис. 1.
2. Совместите плоскость катушки тангенс-гальванометра с направлением магнитной стрелки. Градусный лимб компаса поверните так, чтобы нулевые показания лимба совпали с направлением северного полюса стрелки.
3. Показав собранную цепь преподавателю, включите в сеть источник питания и переключателем **К** замкните цепь. При этом стрелка компаса отклонится от нулевого положения.
4. Установите с помощью магазина сопротивлений **В** ток $I = 3 \text{ мА}$. Подождите, пока колебания стрелки прекратятся, и определите угол отклонения α_1 стрелки от магнитного меридиана при токе 3 мА.
5. Не меняя значения тока I в цепи, с помощью переключателя **К** измените его направление и измерьте угол отклонения α_2 . Величины тока I и углов α_1 и α_2 занесите в таблицу.
6. Вычислите среднюю величину угла $\langle \alpha \rangle = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ и занесите её в таблицу. Покажите, что при указанном способе определения угла отклонения $\langle \alpha \rangle$ исключаются ошибки, связанные с неточной установкой плоскости катушки тангенс-гальванометра в направлении магнитной стрелки.
7. Повторите п.п. 4 – 6 для токов в цепи $I = 6 \text{ мА}$ и $I = 9 \text{ мА}$, Результаты измерений занесите в таблицу.
8. По данным таблицы для трёх токов по формуле (4) рассчитайте величину горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли B_r , найдите среднюю величину $\langle B_r \rangle$ среднюю и погрешность измерения $\langle \Delta B_r \rangle$.
9. Запишите окончательный результат с учётом погрешности измерений.

№	I, мА	α_1	α_2	$\langle \alpha \rangle$	B, Тл	ΔB , Тл
1						
2						
3						
Среднее						

Лабораторная работа № 43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Удельным зарядом элементарной частицы называется отношение заряда частицы q к её массе m : q/m . Для электрона: e/m , где e — заряд электрона. Измерить e/m можно, рассматривая движение электрона в магнитном поле.

На электрон, движущийся со скоростью v в магнитном поле с индукцией B , вектор которой направлен перпендикулярно вектору скорости, действует сила Лоренца, равная:

$$F_{\text{л}} = e \cdot v \cdot B. \quad (1)$$

Сила Лоренца $F_{\text{л}}$ направлена перпендикулярно как вектору B , так и вектору v . Поэтому она является для электрона центростремительной силой $F_{\text{цс}}$, под действием которой электрон движется по окружности радиуса R :

$$F_{\text{цс}} = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (2)$$

Полагая, что $F_{\text{цс}} = F_{\text{л}}$, получаем:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot R}. \quad (3)$$

Целью работы является определение удельного заряда e/m электрона.

Принципиальная схема установки (рис. 1)

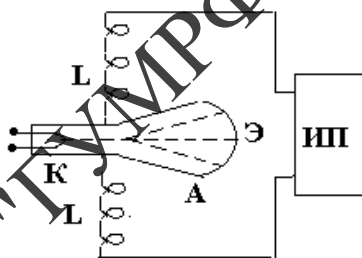


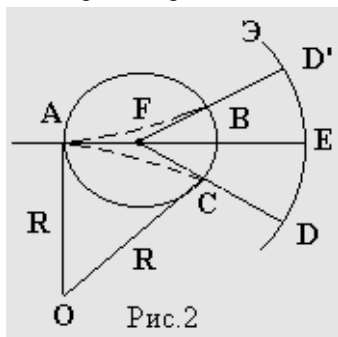
Рис. 1

Из катода K электронно-лучевой трубки испускается пучок электронов, который разгоняется разностью потенциалов U между катодом K и анодом A трубки. Скорость движения v электронов может быть найдена из равенства (4).

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U. \quad (4)$$

Попадая на экран Э, электроны вызывают его свечение в виде пятна или полосы (при наличии горизонтальной резвёртки). Однородное магнитное поле индукции **B** создаётся соленоидами **L**, между которыми расположена электронно-лучевая трубка так, чтобы векторы **v** и **B** были взаимно перпендикулярны. Питание соленоидов обеспечивается источником питания **III**. Величина тока **I** в соленоидах может меняться соответствующими регулировками. Тем самым меняется индукция **B** магнитного поля, вызывающего отклонение электронного пучка в трубке. При этом светящаяся точка на экране (или полоса) смещается по вертикали.

На рис. 2 представлена часть траектории движения электронов в



трубке от момента вхождения их в магнитное поле (от точки **A**) до экрана. Кругом на рис. 2 обозначено поперечное сечение соленоидов **L**, т.е. то место в трубке, где существует магнитное поле. В отсутствие поля электроны движутся прямолинейно и попадают на экран в точке **E**. В магнитном поле электронный пучок отклоняется от своего первоначального направления и в случае постоянного

поля попадает на экран в точку **D** (**D'**), а при переменном поле размывается в вертикальную полосу длиной **DD'**. При одном и том же значении индукции **B** магнитного поля $DD' = 2DE$.

Величина **DE** представляет собой смещение пучка электронов под действием постоянного магнитного поля. На участке траектории **AC**, на протяжении которого электроны находятся в поле, они движутся по дуге окружности радиуса **R**. По выходе из магнитного поля, электроны далее движутся по прямолинейной траектории **CD**. Продолжив прямую **CD** до пересечения с первоначальной траекторией движения **AB**, получаем точку **F**. Соленоиды **L** и трубка расположены так, чтобы точка **F** находилась на оси соленоидов в центре магнитного поля. В первом приближении дуги **AC** и **DE** можно заменить прямыми линиями. Тогда из подобия треугольников **AOC** и **EDF** следует: $AO/AC = FE/ED$. Обозначив $AO = R$, $DE = a$, $FE = b$ — расстояние от центра соленоидов до экрана, и полагая, в первом приближении, $AC = d$, где **d** — диаметр соленоидов, получаем:

$$R = \frac{b \cdot d}{a}. \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (3) значение v из (4) и R из (5), получаем соотношение для определения удельного заряда электрона в постоянном магнитном поле:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{b^2 \cdot d^2} \left(\frac{a}{B} \right)^2. \quad (6)$$

Такое же выражение имеет место и для переменного магнитного поля. Под величиной a в этом случае понимается длина вертикальной линии DD' .

Таким образом, экспериментально определяя зависимость отклонения электронного луча a от индукции магнитного поля B , и зная параметры установки, можно определить удельный заряд электрона e/m . Измерения возможно проводить как в постоянном, так и в переменном магнитном полях.

В работе применяется электронно-лучевая трубка монитора "Электроника-409". На экране трубки закреплена масштабная линейка.

Соленоиды конечной длины, которые используются в работе, не создают идеально однородного магнитного поля. Это хорошо заметно по искривлению полосы на экране монитора. Кроме того, траектория движения электронов в электронно-лучевой трубке отличается от траектории, изображённой на рис.2. Поэтому возникает необходимость введения в расчётные формулы для вычисления e/m определённых поправок (поправки α для постоянного и κ для переменного магнитного поля, учитывающие конечные размеры соленоидов, и поправка a_0 , учитывающая геометрию установки). Поправки отражены в приводимых ниже формулах.

А) ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Значение индукции магнитного поля соленоида рассчитывается по формуле:

$$B = \mu_0 \cdot \alpha \cdot n \cdot I. \quad (7)$$

Здесь μ_0 — магнитная постоянная, I — ток, протекающий по катушкам соленоида, n — число витков соленоида на единицу его длины, α — коэффициент, учитывающий конечную длину соленоидов и геометрию установки. Схема установки представлена на рис. 2

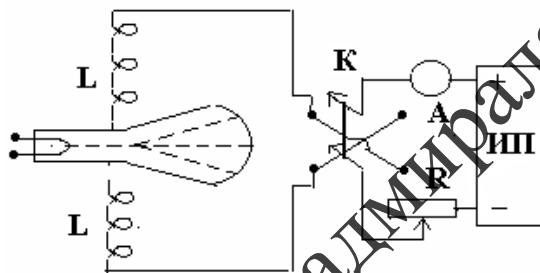


Рис. 2

Ток в катушки соленоидов L подается от источника ИП, С помощью переключателя Π направление тока в катушках можно изменять на противоположное. Величина тока измеряется амперметром A и может изменяться реостатом R .

Порядок выполнения работы

1. Включите установку и дайте прогреться трубке, пока на экране не появится светлая горизонтальная полоса. По масштабной линейке отметьте **координату начального положения** полосы.

2. При нейтральном положении переключателя Π включите источник питания соленоидов. Отрегулируйте выходное напряжение источника $U_{\text{вых}} = 20 \text{ В}$.

3. Переключателем K подайте ток на катушки соленоидов. Установите силу тока $I = 0,1 \text{ А}$ и на экране трубки определите смещение a_1 полосы от начального положения по масштабной линейке. Измерения проводите с точностью до 0,5 мм (половина минимального деления масштабной линейки).

4. Измените направление тока в соленоиде переключателем **П**. На экране трубки определите величину координаты смещения полосы **a₂** от начального положения в противоположном направлении.

5. По двум значениям **a₁** и **a₂** определите среднюю величину смещения луча **a_{ср}** при данном токе **I**. Значения **I**, **a₁**, **a₂**, **a_{ср}** занесите в таблицу.

6. Повторите измерения по пп.3 -5 для всех значений сил токов **I**, указанных в лаборатории. Полученные данные занесите в таблицу.

7. Для каждого тока **I** по формуле (7) определите величину индукции магнитного поля **B** и занесите в таблицу.

8. Для каждого значения индукции магнитного поля **B** определите удельный заряд электрона **e/m** по формуле

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{b^2 \cdot d^2} \cdot \left(\frac{a - a_0}{B} \right)^2. \quad (8)$$

Найдите погрешность измерений **Δ(e/m)**.

9. Вычислите среднее значение величины удельного заряда электрона **e/m** и среднюю погрешность измерений **Δ(e/m)**.

10. Запишите окончательный результат измерений удельного заряда электрона с учётом погрешностей измерений.

11. Сравните полученную величину удельного заряда электрона **e/m** с табличным значением

Значения параметров **U**, **a₀**, **p**, **b**, **d**, **a₀** и интервал токов **I** приводятся в лаборатории.

Таблица 1

№ п/п	I, А	a ₁ , мм	a ₂ , мм	a _{ср} , мм	B, мТл	e/m, Кл/кг	Δ(e/m), Кл/кг
1	0,1						
2	0,2						
ит.д.							
Среднее:							

Б) ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

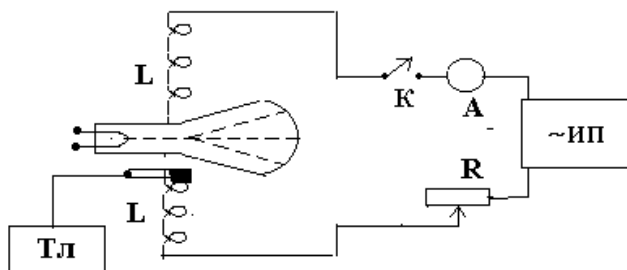


Рис.3

Схема установки приведена на рис. 3. На катушки соленоидов L подаётся переменное напряжение от источника $\sim$ ИП. Величина тока регулируется реостатом R и может измеряться амперметром A .

При прохождении через соленоид синусоидального переменного тока $I = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ в нём возникает переменное магнитное поле такой же частоты: $B = B_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$.

В переменном магнитном поле линия на экране превращается в вертикальную полосу. При одном и том же B размеры a полосы здесь вдвое превышают величину отклонения пятна от начального положения в постоянном магнитном поле. Поэтому, исходя из соотношения (6), с учётом того, что в переменном поле отклонение луча вдвое больше, чем в постоянном, связь между a и индукцией магнитного поля B записывается в виде:

$$a = k \cdot \frac{2 \cdot b \cdot d}{\sqrt{2 \cdot U}} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot B. \quad (9)$$

Здесь k — поправка на неоднородность магнитного поля в месте нахождения трубки. С учётом поправки a_0 на геометрию установки формула (9) приобретает вид:

$$a = a_0 + k \cdot \frac{2 \cdot b \cdot d}{\sqrt{2 \cdot U}} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot B. \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что график зависимости размеров полосы a на экране от индукции поля B представляется прямой линией, проходящей

через точку a_0 на оси ординат. Наклон этой линии пропорционален удельному заряду электрона e/m .

Индукция магнитного поля B измеряется тесламетром Тл, датчик которого находится внутри соленоидов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включите в сеть установку и дайте прогреться монитору несколько минут. На экране возникнет светлая горизонтальная полоса.

2. Отрегулируйте работу тесламетра в соответствии с указаниями преподавателя. При разомкнутом ключе K установите выходное напряжение источника питания соленоидов $U_{\text{вых}} = 20 \text{ В}$.

3. Подайте ток на соленоиды, замкнув ключ K . Установите, с помощью реостата R , ток $I = 0,1 \text{ А}$. Определите по тесламетру индукцию магнитного поля B и размеры полосы a на экране. Значения B и a запишите в таблицу.

4. Проводите измерения по п. 3 для всех значений сил токов I , указанных в лаборатории. Для каждого тока определяйте индукцию магнитного поля B и размеры полосы a на экране. Все данные записывайте в табл. 2.

5. По данным таблицы постройте график зависимости величины a от магнитной индукции B . По наклону графика, в соответствии с формулой (10), вычислите значение удельного заряда электрона e/m . Этот наклон равен:

$$\frac{da}{db} = k \cdot \frac{2 \cdot b \cdot d}{\sqrt{2 \cdot U}} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \quad (11)$$

Погрешность измерения $\Delta(e/m)$ найдите графическим способом.

6. Сравните полученную величину удельного заряда электрона e/m с табличной величиной.

Значения U , k , b , d и интервал токов I приводятся в лаборатории.

Таблица 2

№ п/п	$I, \text{ А}$	$B \text{ мТл}$	$a, \text{ мм}$
1	0,1		
2	0,2		
и т.д.			

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 44

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ, ОБЛАДАЮЩИХ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Существуют вещества, которые, в силу особенностей своего молекулярного строения, обнаруживают особые электрические и магнитные свойства. К таким веществам относятся

1. **Сегнетоэлектрики**, имеющие большую диэлектрическую проницаемость ϵ , достигающие значений нескольких тысяч и являющуюся функцией напряжённости E_0 внешнего электрического поля (сегнетова соль, титанат бария и др.)

2. **Ферромагнетики**, магнитная проницаемость μ которых зависит от напряжённости H_0 внешнего магнитного поля и на 2-3 порядка превышает значение μ для других магнетиков (Fe, Co, Ni, их сплавы и др.).

При определённой температуре T_k , индивидуальной для каждого вещества, их особые свойства исчезают, и сегнетоэлектрики становятся обычными диэлектриками, а ферромагнетики превращаются в парамагнетики. Эта температура носит название **температуры Кюри**.

Молекулы этих веществ имеют собственные дипольные p_e (сегнетоэлектрики) и магнитные p_m моменты. Если энергия взаимодействия между моментами превышает энергию теплового движения, в веществах возникают микрообласти, в которых молекулы и, соответственно, их моменты располагаются параллельно друг другу. Эти микрообласти получили название **доменов**. В отсутствие внешнего поля при $T < T_k$ домены хаотически ориентируются друг относительно друга (рис. 1, а), и поле внутри вещества отсутствует.

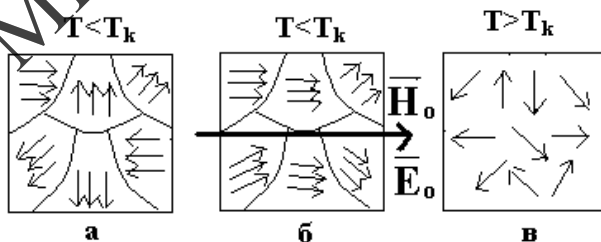


Рис. 1

Если вещество с доменной структурой поместить во внешнее поле, молекулярные моменты $\mathbf{p}_e$ (сегнетоэлектрики в поле $\mathbf{E}_0$) и $\mathbf{p}_m$ (ферромагнетики в поле $\mathbf{H}_0$) будут ориентироваться вдоль поля. В результате поле внутри вещества резко возрастёт (рис. 1, б). Степень ориентации моментов зависит от величины поля.

При повышении температуры $T > T_K$ энергия хаотического движения молекул в доменах превысит энергию взаимодействия диполей, домены разрушаются и вещество теряет свои сегнетоэлектрические или ферромагнитные свойства (рис. 1, в). Такой процесс обратим, и при понижении

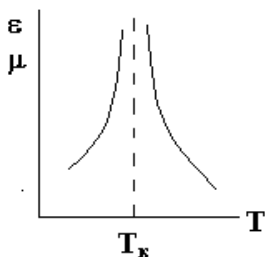


Рис. 2

температуры ниже температуры Кюри домены снова возникают, и вещества вновь становятся сегнетоэлектриками либо ферромагнетиками.

Схематически температурная зависимость ϵ и μ представлена на рис. 2. Выше T_K эта зависимость определяется закономерностью:

$$\epsilon, \mu \sim \frac{1}{T - T_0}. \quad (1)$$

T_0 — температура Кюри-Вейса, близкая по своим значениям к T_K . В сегнетоэлектриках и ферромагнетиках наблюдается явление **гистерезиса** (рис. 3).

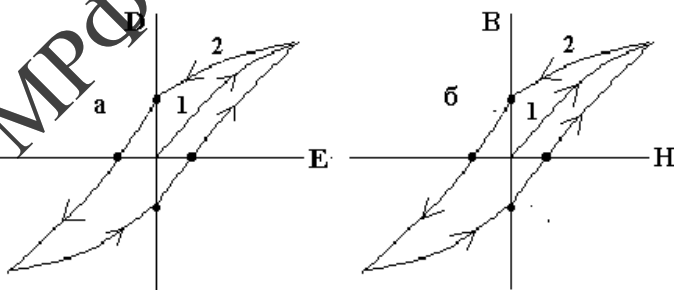


Рис. 3

Явление гистерезиса заключается в том, что при приложении поля к веществу, его увеличении (кривая 1 на рис. 3), последующем уменьшении и смене направления на противоположное, зависимость индукции электрического поля $\mathbf{D}$ от напряжённости $\mathbf{E}$ и индукции магнитного поля $\mathbf{B}$ от напряжённости $\mathbf{H}$ описывается сложной кривой — **петлёй гистерезиса** (кривые 2 на рис. 3).

Физическая причина существования петли гистерезиса заключается в том, что при смене направления векторов напряжённостей $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ поля у подобных веществ происходит переориентация дипольных моментов внутри доменов, вызывающих их вращение, изменение формы и размеров доменов. Для такого изменения молекулярной структуры вещества необходимо затратить определённую работу. Для одного цикла изменения поля эта работа равна: $A = \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{E}$ в сегнетоэлектриках и $A = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{H}$ в ферромагнетиках. Видно, что работа равна площади петли гистерезиса.

А) НАБЛЮДЕНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА

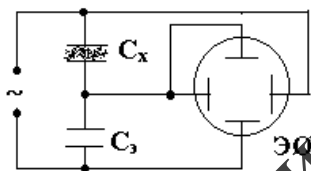


Рис.4

В основу метода наблюдения петли гистерезиса на экране осциллографа ЭО положена схема, представленная на рис. 4. Эталонный конденсатор C_0 и исследуемый конденсатор C_x соединены последовательно и питаются переменным током от внешнего источника. Эталонный конденсатор C_0 имеет постоянную

диэлектрическую проницаемость ϵ_0 , конденсатор C_x заполнен сегнетоэлектриком (титанатом бария BaTiO_3). Конденсатор C_x соединён с горизонтально отклоняющими пластинами осциллографии, конденсатор C_0 — с вертикально отклоняющими пластинами. Напряжение U на конденсаторе C_x пропорционально напряжённости поля $\mathbf{E}$ в диэлектрике. Поэтому горизонтальное отклонение луча на экране пропорционально $\mathbf{E}$. Напряжение U на эталонном конденсаторе C_0 пропорционально индукции $\mathbf{D}$ электрического поля в нём. Конденсаторы C_x и C_0 соединены последовательно, поэтому заряды и индукции полей в обоих конденсаторах одинаковы. Следовательно, вертикальное отклонение луча на экране ЭО пропорционально

индукции $\mathbf{D}$ поля. В результате за один цикл изменения напряжения $\mathbf{U}$ на конденсаторах на экране осциллографа будет изображена петля гистерезиса, отвечающая зависимости $\mathbf{D} = \mathbf{D}(\mathbf{E})$ в сегнетоэлектрике.

Для определения температур Кюри T_k и Кюри-Вейса T_0 измеряют зависимость ёмкости C_x , заполненной сегнетоэлектриком, от температуры. Поскольку ёмкость конденсатора пропорциональна диэлектрической постоянной ϵ , из уравнения (1) следует $C_x \sim 1/(T - T_0)$, откуда:

$$\frac{1}{C_x} \sim T - T_0 \quad (2)$$

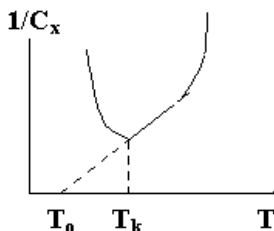


Рис.5

Типичный график зависимости (2) представляет собой кривую с минимумом (рис.5). Температура, при которой на графике этой зависимости значение $1/C_x$ минимально, соответствует температуре Кюри T_k . Точка пересечения линейного продолжения этого участка с осью температур определяет значение T_0 температуры Кюри-Вейса.

Целью работы является наблюдение формы петли гистерезиса для сегнетоэлектрика выше и ниже температуры Кюри и определение температур Кюри T_k и Кюри-Вейса T_0 .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ



Рис.6

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 6:

- 1 — блок управления с измерителем температуры;
- 2 — блок нагрева испытуемого образца;
- 3 — испытуемый образец в трубчатой печи;
- 4 — измеритель ёмкости;
- 5 — осциллограф.

Установка полностью собрана на лабораторном столе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включите блоки 1 – 5 установки в сеть. Блок нагрева образца 2 должен быть выключен. В соответствии с указаниями преподавателя произве-

дите регулировку ручек управления осциллографа 5 и измерителя ёмкости 4.

2. Установите рукоятку режима измерений блока 1 в положение “Гистерезис”. Зарисуйте форму петли гистерезиса, появившуюся на экране осциллографа, положив на экран лист бумаги.

3. Установите рукоятку режима измерений блока 1 в положение “Ёмкость”. Определите величину ёмкости конденсатора C_x при комнатной температуре $T^\circ\text{C}$, которую определите на измерителе температуры. Занесите в табл.измеренные значения температуры $T^\circ\text{C}$ и ёмкости C_x . Величина ёмкости измеряется в пикофарадах (пФ).

4. Вновь переведите рукоятку режима измерений блока 1 в положение “Гистерезис” и включите блок 2 нагрева образца. Испытуемый образец начнёт нагреваться.

5. При нагревании образца следите за изменением формы петли гистерезиса. Определите температуру T_v , при которой петля превратится в линию (“вырождение” петли гистерезиса). Сделайте рисунок вырожденной петли при этой температуре.

6. Нагревайте образец до 170°C , после чего выключите нагрев, а рукоятку режима измерений блока 1 переведите в положение “Ёмкость”.

7. Производите измерения ёмкости C_x конденсатора через каждые 10°C при его охлаждении в интервале температур от 170°C до 60°C . Значения T и C_x заносите в таблицу.

8. Вновь переведите рукоятку режима измерений блока 1 в положение “Гистерезис” и зарисуйте форму петли гистерезиса с экрана осциллографа при температуре $\sim 60^\circ\text{C}$.

9. По данным таблицы рассчитайте значение $1/C_x$ и на миллиметровой бумаге постройте график зависимости этой величины (ордината) от температуры T (абсцисса).

10. По графику полученной зависимости, согласно рис. 5, определите температуры Кюри T_k и Кюри–Вейса T_0 . Сравните эти температуры с температурой вырождения T_v петли гистерезиса, найденной в п. 5.

11. Запишите окончательный результат, который должен содержать:

-Значения температур: T_v , T_k , T_0 .

-Рисунки:

Петля гистерезиса при комнатной температуре,

“Вырожденная” петля гистерезиса,

Петля гистерезиса при температуре **60 °С**, появившаяся при охлаждении образца.

График зависимости $1/C_x$ от T .

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	170	160	150	И т.д. до	60	$T_{\text{комн}}$
$C_x, \text{пФ}$						
$1/C_x, \text{пФ}^{-1}$						

Б) ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для изучения свойств ферромагнитных материалов используется установка, схема которой приведена на рис. 7.

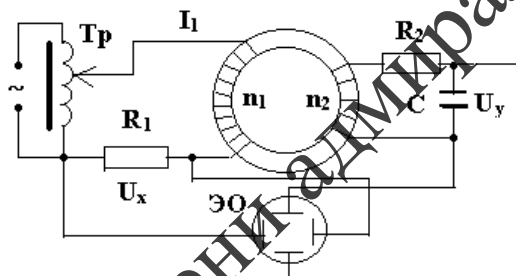


Рис. 7

Установка содержит автотрансформатор Tr и ферромагнитное кольцо (тор) с двумя обмотками, содержащими n_1 и n_2 витков соответственно. В первичную цепь введено сопротивление R_1 , параллельно которому подключены горизонтально отклоняющие пластины осциллографа ЭО. При подаче на первичную обмотку переменного напряжения, в ней протекает ток I_1 , создающий магнитное поле напряжённостью H . Падение напряжения U_x на сопротивлении R_1 пропорционально току I_1 и, следовательно, напряжённости магнитного поля H . Напряжение U_x подаётся на горизонтальные отклоняющие пластины осциллографа ЭО. В результате отклонение x луча на экране осциллографа оказывается пропорциональным напряжённости H магнитного поля.

Переменное магнитное поле $\mathbf{H}$ вызывает в ферромагнитном сердечнике тора переменное поле с индукцией $\mathbf{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}$. Это поле индуцирует во вторичной обмотке ЭДС индукции:

$$E_{\text{и}} = \frac{dB}{dt} \cdot S, \quad (3)$$

где S — площадь поперечного сечения тора.

ЭДС $E_{\text{и}}$ замыкается на интегрирующую цепочку, имеющую постоянную времени $\tau = R_2 \cdot C$, значительно превышающую период T колебаний индукции магнитного поля $\mathbf{B}$. В этих условиях ($\tau \gg T$) на конденсаторе C формируется переменное напряжение $U_y \sim B$, которое подаётся на вертикальные отклоняющие пластины осциллографа ЭО.

Экран осциллографа снабжён масштабной сеткой. Отклонения n_x луча по горизонтали и n_y по вертикали связаны с напряжённостью внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$ и его индукцией в ферромагнетике $\mathbf{B}$ уравнениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \alpha_x \cdot n_x \\ \mathbf{B} &= \alpha_y \cdot n_y \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь α_x и α_y — постоянные для данной установки, значения которых даются в лаборатории.

Целью работы является наблюдение петли гистерезиса в ферромагнетике, построение кривой намагничивания (см. также работу № 35) и определение зависимости магнитной проницаемости μ от напряжённости $\mathbf{H}$ внешнего магнитного поля.

Установка полностью собрана на лабораторном столе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ручку автотрансформатора поверните до упора против часовой стрелки и включите установку в сеть.
2. С помощью ручек горизонтального (x) и вертикального (y) смещения луча осциллографа установите светящееся пятно в центр экрана.
3. Подайте напряжение на первичную обмотку и увеличивайте его до тех пор, пока петля гистерезиса не займёт большую часть экрана.
4. Снимите с экрана осциллографа на кальку петлю гистерезиса.

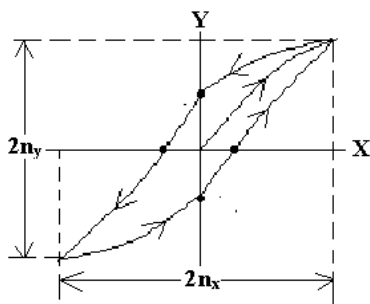


Рис.8

5. Определите максимальные отклонения луча на экране (вершины петли) по горизонтали (n_x) и вертикали (n_y) и запишите данные в табл. 2. Для уменьшения ошибок, обусловленных неточным расположением петли относительно координатной сетки, измерения проводите в соответствии с рис.8. Расстояния между вершинами петли гистерезиса вдоль осей X и Y равны удвоенной величине координаты соответствующей вершины. Значения n_x и n_y определяйте с точностью до 1 мм.

6. Уменьшая напряжение на первичной обмотке, получите несколько (6 — 8) убывающих по размерам петель гистерезиса. По координатной сетке на экране определите положения вершин петель по горизонтали — n_x — и вертикали — n_y . Все данные измерений запишите в табл. 2.

7. Уменьшите напряжение на первичной обмотке до нуля и выключите установку.

8. Используя пропорциональную зависимость (4) между отклонениями луча осциллографа n_x и n_y и напряженностью H и индукцией B магнитного поля в ферромагнетике, вычислите соответствующие значения H и B . Результаты занесите в табл. 3.

9. Вычислите значения относительной магнитной проницаемости μ ферромагнетика по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}. \quad (5)$$

Результаты вычислений занесите в табл. 3.

10. По данным табл. 2 постройте кривую намагничения — график зависимости индукции B магнитного поля в ферромагнитном образце от напряженности H внешнего поля.

11. По данным табл. 2 постройте график зависимости магнитной проницаемости μ от напряженности H магнитного поля.

12. Оцените погрешности измерения напряжённости ΔH и индукции ΔB магнитного поля по формулам:

$$\Delta H = \alpha_x \cdot \Delta n_x$$

$$\Delta B = \alpha_y \cdot \Delta n_y$$
(6)

В качестве погрешностей координатной сетки Δn_x и Δn_y возьмите её инструментальную погрешность.

13. Окончательный результат должен содержать:

Рисунок петли гистерезиса.

График зависимости B от H (кривая намагничения).

График зависимости μ от H .

Таблица 2

$n_x, \text{мм}$							
$n_y, \text{мм}$							

Таблица 3

$H, \text{А/м}$							
$B, \text{Тл}$							
μ							

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 45

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

ФЕРРОМАГНЕТИКА.

ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ СТОЛЕТОВА

Магнитное поле создаётся электрическими токами (т.е. движущимися электрическими зарядами). Такие токи получили название “макротоки”. Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции. В отсутствие вещества, т.е. в вакууме, макротоки создают магнитное поле, имеющее индукцию B_0 .

Магнитное поле внутри вещества имеет величину магнитной индукции B , отличающуюся от величины магнитного поля B_0 вне вещества (в вакууме). Объяснение этому различию даётся гипотезой Ампера, согласно которой в атомах и молекулах вещества существует система “микротоков”, создающих в них магнитные моменты p . Ориентация этих моментов во внешнем магнитном поле изменяет величину индукции B_0 . Влияние вещества (магнетика) на магнитное поле зависит от рода вещества. Количественной мерой этого влияния служит величина μ — относительная магнитная проницаемость среды (вещества).

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (1)$$

В зависимости от величины μ все вещества делятся на три класса — диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

В диамагнетиках и парамагнетиках величина μ близка к единице, при этом у первых $\mu < 1$, у вторых — $\mu > 1$. В ферромагнетиках μ значительно (на порядки) превышает единицу и не является постоянной величиной. В этих веществах магнитная проницаемость сложным образом зависит от величины внешнего магнитного поля B_0 .

Первое экспериментальное исследование зависимости μ ферромагнетиков от B_0 выполнил в 1871-72 г.г. профессор МГУ А. Г. Столетов. Поэтому кривая зависимости $\mu = f(B_0)$ называется *кривой Столетова*.

Целью работы является исследование зависимости $\mu = f(B_0)$ с помощью предложенного Столетовым метода.

А) ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

На железный сердечник в виде тора намотана первичная обмотка, содержащая N_1 витков. Обмотка питается постоянным током от источника ИП. Величина тока измеряется амперметром А и может меняться с помощью реостата R. Направление тока через первичную обмотку можно менять переключателем К. На тороидальный сердечник также намотана вторичная обмотка 2, имеющая N_2 витков. Вторичная обмотка соединяется с баллистическим гальванометром G.

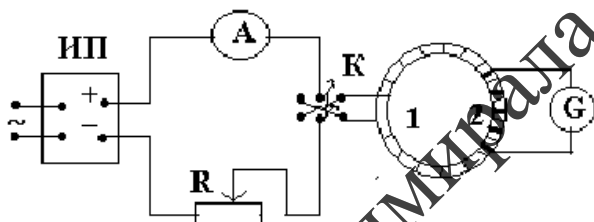


Рис.1

Баллистический гальванометр позволяет измерять величину заряда q , прошедшего через некоторую электрическую цепь. Он представляет собой чувствительный электроизмерительный прибор с оптической индикацией, период колебаний подвижной системы которого много больше времени прохождения заряда через катушку гальванометра. В этом случае, при быстром прохождении заряда q , подвижная система получает некоторый импульс силы, и по инерции световой указатель гальванометра отклонится на некоторое число делений n шкалы. В таком гальванометре отклонение $n \sim q$:

$$q = b \cdot n. \quad (2)$$

Множитель пропорциональности b в уравнении (2) носит название **баллистической постоянной** гальванометра. Баллистическая постоянная численно равна заряду, который, при прохождении через гальванометр, вызывает отклонение указателя на одно деление.

При протекании по первичной обмотке “макротока” I , в торе возникает магнитное поле, индукция которого B_0 определяется соотношением:

$$B_0 = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N_1}{L}. \quad (3)$$

Здесь L — длина сердечника тороида, μ_0 — магнитная постоянная.

Индукцию B магнитного поля в железном ферромагнитном сердечнике можно определить следующим образом. Поток Φ магнитной индукции через площадь поперечного сечения сердечника равен:

$$\Phi = B \cdot S. \quad (4)$$

Если направление тока I в первичной обмотке изменить ключом K на противоположное, то изменение потока магнитной индукции $\Delta\Phi$ через поперечное сечение тороида будет равно:

$$\Delta\Phi = (B \cdot S) - (-B \cdot S) = 2 \cdot B \cdot S. \quad (5)$$

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, при изменении потока магнитной индукции через контур (в данном случае — вторичную обмотку), в нём возникает электродвижущая сила индукции:

$$|E_n| = N_2 \cdot \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|. \quad (6)$$

ЭДС индукции создаёт в замкнутом вторичном контуре ток I_n , значение которого по закону Ома определяется формулой

$$E_n = I_n \cdot R_2, \quad (7)$$

где R_2 — полное сопротивление вторичной обмотки и гальванометра.

При прерывании тока через гальванометр, через его подвижную систему проходит заряд:

$$\Delta q = I_n \cdot \Delta t. \quad (8)$$

Количество заряда, согласно формуле (2), связано с баллистической постоянной b гальванометра соотношением: $\Delta q = b \cdot n$, где n — максимальное отклонение стрелки гальванометра при быстром изменении направления тока в первичной обмотке.

Комбинируя уравнения (5) — (8) с учётом уравнения (2), для величины магнитной индукции в сердечнике тороида получаем:

$$B = \frac{b \cdot n \cdot R_2}{2 \cdot S \cdot N_2}. \quad (9)$$

Согласно уравнению (1), $\mu = B/B_0$. Из уравнений (3) и (9) для магнитной проницаемости ферромагнетика получаем расчётную формулу:

$$\mu = \frac{b \cdot R_2 \cdot L \cdot n}{2 \cdot \mu \cdot S \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot I}. \quad (10)$$

Это уравнение можно переписать в виде:

$$\mu = k \cdot \frac{n}{I}. \quad (11)$$

Здесь k представляет собой постоянную для данной установки величину:

$$k = \frac{b \cdot R_2 \cdot L}{2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot N_1 \cdot N_2}. \quad (12)$$

Таким образом, согласно уравнению (3), значение индукции B_0 внешнего магнитного поля пропорционально току I в первичной обмотке, а значение магнитной проницаемости μ , в соответствии с уравнением (11), пропорционально n/I . Следовательно, зависимость $\mu = f(B_0)$ должна повторять зависимость $n/I = f(I)$. Построение этой зависимости, которая представляет собой кривую Столетова, и является целью данной работы.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите цепь согласно рис. 1 и покажите преподавателю.
2. Включите источник питания и, замкнув первичную цепь с помощью ключа K , установите минимальный ток I из рекомендуемых в лаборатории. Запишите это значение тока в таблицу.

3. Быстро изменив направление тока в первичной обмотке ключом K , следите за отбросом стрелки гальванометра. Отметьте максимальное отклонение n_1 гальванометра при данном токе. Не изменяя силы тока, измените его направление переключателем K и определите величину отброса n_2

гальванометра в противоположном направлении. Определите среднее значение отклонения $\langle n \rangle$ при данном токе. Значения n_1 , n_2 , $\langle n \rangle$ запишите в таблицу.

4.Повторите процедуру, описанную в п. 2 и 3 для всех значений сил токов, указанных в лаборатории, каждый раз записывая значения I , n_1 , n_2 , $\langle n \rangle$ в таблицу.

5.Вычислите значения отношений $\langle n \rangle / I$ для каждого тока I и занесите результат в таблицу.

6.По полученным данным на миллиметровой бумаге постройте график зависимости $\langle n \rangle / I$ от I . В соответствии с изложенным выше, этот график повторяет зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнетика от индукции B_0 внешнего магнитного поля.

7.Для максимального значения отношения $(\langle n \rangle / I)_{\text{макс}}$ на графике и соответствующего ему значения тока I по формулам (3) и (9) вычислите значения индукций магнитных полей — внешнего B_0 и поля в ферромагнетике B . В соответствии с формулой (1), найдите значение магнитной проницаемости μ , соответствующее максимуму кривой Столетова.

8.Определите по формуле (12) значение постоянной k для данной установки. Воспользовавшись величиной $(\langle n \rangle / I)_{\text{макс}}$, по формуле (11) определите значение магнитной проницаемости μ .

Значения параметров установки b , R_2 , N_1 , N_2 , L , S приведены в лаборатории. Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Таблица 1

I, А	n, дел			$\langle n \rangle / I$, дел/А
	n_1	n_2	$\langle n \rangle$	
0,1				
0,2				
0,3				
и т.д.				
1.0				

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 46 **СЛОЖЕНИЕ ВЗАИМНО-ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ.** **ИЗУЧЕНИЕ ФИГУР ЛИССАЖУ**

Тело, подвешенное к системе взаимно-перпендикулярных пружин, имеет две степени свободы — вдоль осей X и Y (рис. 1)

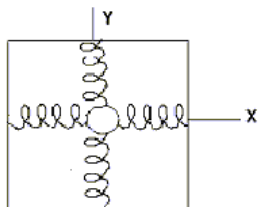


Рис.1

Такое тело может одновременно участвовать в двух независимых гармонических колебаниях вдоль обеих осей. Если эти колебания имеют одну и ту же круговую частоту ω , они описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} X &= A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \\ Y &= A_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (1)$$

где A_1 и A_2 — амплитуды колебаний, φ_1 и φ_2 — начальные фазы.

Поскольку $\omega = 2\pi f$, где f — частота колебаний в Гц, приведенные уравнения могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} X &= A_1 \sin(2\pi f t + \varphi_1) \\ Y &= A_2 \sin(2\pi f t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (2)$$

Траектория движения тела, совершающего два взаимно-перпендикулярных гармонических колебания, представляется уравнением:

$$\frac{X^2}{A_1^2} + \frac{Y^2}{A_2^2} - \frac{2 \cdot X \cdot Y}{A_1 \cdot A_2} \cdot \cos \Delta \varphi = \sin^2 \Delta \varphi. \quad (3)$$

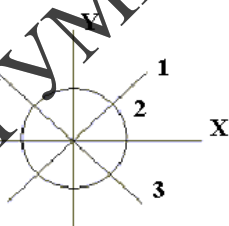


Рис.2

Здесь $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ — разность фаз колебаний вдоль осей X и Y . При условии равенства амплитуд обоих колебаний ($A_1 = A_2$) некоторые примеры траектории движения тела приведены на рис. 2. Траектория при $\Delta \varphi = 0$ представляется прямой 1, при $\Delta \varphi = \pi/2$ — окружностью 2, при $\Delta \varphi = \pi$ — прямой 3. Траектории движения тела, совершающего гармонические колебания одновременно вдоль осей X и Y , называются фигурами Лиссажу.

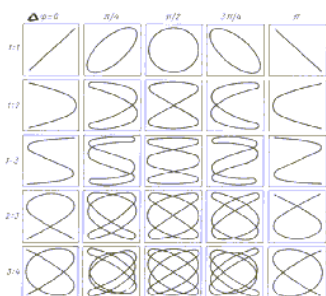


Рис.3

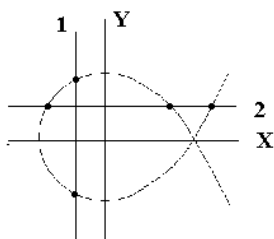


Рис.4

Простейшие из этих фигур изображены на рис. 2. Если же частоты колебаний вдоль осей X и Y различны, форма фигур Лиссажу усложняется и зависит от отношения частот f_x/f_y и величины $\Delta\phi$. Для некоторых f_x/f_y и $\Delta\phi$ вид кривых Лиссажу приведен на рис.3.

Форма фигуры Лиссажу позволяет определить отношение частот колебаний f_x/f_y вдоль осей X и Y при любых $\Delta\phi$. (рис. 4) Для этого через полученную фигуру необходимо провести две прямые, параллельные осям X и Y так, чтобы они пересекали траекторию движения точки (фигуру Лиссажу) максимальное число раз (прямые 1 и 2 на рис. 4). Если число пересечений фигуры Лиссажу прямой, параллельной оси X равно n_x , а параллельной оси Y равно n_y ,

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{n_y}{n_x}. \quad (4)$$

Иными словами, отношение частот вдоль осей X и Y **обратно пропорционально** отношению числа пересечений прямых, параллельных этим осям.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

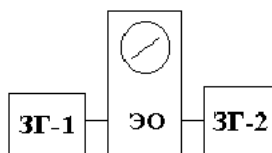


Рис.5

Моделью колеблющегося тела в работе является точка на экране осциллографа ЭО, на взаимно перпендикулярные отклоняющие пластины которого подается синусоидальное напряжение от звуковых генераторов ЗГ-1 и ЗГ-2 (рис. 5). Поэтому точка участвует в двух движениях по осям X и Y .

Образование фигур Лиссажу для различных отношений частот колебаний от звуковых генераторов ЗГ-1 и ЗГ-2 можно наблюдать на экране осциллографа 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить осциллограф и оба генератора в сеть и дать им прогреться в течение 5 минут.

2. **Градуйрование шкалы генератора ЗГ-1 с помощью генератора ЗГ-2.** Шкала генератора ЗГ-1 разделена на 10 делений. Устанавливая последовательно указатель генератора ЗГ-1 на деления от 1 до 10 и вращая ручку настройки генератора ЗГ-2, для каждого деления N шкалы определять соответствующую частоту f , добиваясь равенства частот обоих генераторов. При равенстве частот на экране осциллографа образуется одна из фигур, отмеченных на рис. 2. Данные занести в табл. 1. По результатам измерений построить градуировочный график зависимости N от f .

3. **Изучение фигур Лиссажу и определение с их помощью отношения частот генераторов ЗГ-1 и ЗГ-2.** Установить на генераторе ЗГ-1 любое положение указателя шкалы в пределах первой ее половины. При помощи генератора ЗГ-2 определить частоту f_0 генератора ЗГ-1. Записать величину f_0 в табл. 2.

Вращая ручку настройки генератора ЗГ-2, получить две максимально стабильные фигуры Лиссажу для частот меньших и больших f_0 и определить эти частоты. Полученные значения $f_1, f_2 < f_0$ и $f_3, f_4 > f_0$ записать в табл. 2 и зарисовать там же формы кривых Лиссажу, соответствующих различным частотам.

По результатам табл. 2 вычислить экспериментальные значения отношений частот f_i/f_0 . Эти же данные получить при помощи анализа фигур

Лиссажу в соответствии с процедурой, изложенной в описании работы. Сравнить оба способа определения отношения частот колебаний двух генераторов.

Таблица 1

N	1	2	и т.д., до	10
f, Гц				

Таблица 2

	f_1	f_2	f_0	f_3	f_4
Частота, Гц					
Рисунок фигуры Лиссажу					
f_i/f_0 эксперим.					
f_i/f_0 из фигуры Лиссажу					

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 47 **ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ** **КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ**

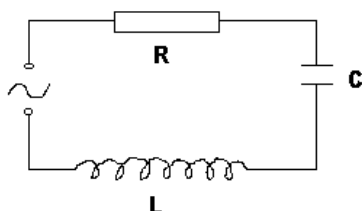


Рис. 1

Одна из разновидностей электрического колебательного контура представляет собой последовательно соединенные конденсатор C , катушку индуктивности L и сопротивление R (рис. 1)

Собственная круговая частота колебаний ω_0 такого контура равна:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}. \quad (1)$$

Соответственно, собственная частота колебаний в Герцах для него определяется формулой:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}. \quad (2)$$

При включении в контур внешнего источника с периодически изменяющейся ЭДС:

$$E = E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (3)$$

(E_0 — амплитуда, ω — круговая частота колебаний), в нем возникают вынужденные колебания тока с той же частотой ω и фазой, отличающейся от фазы ЭДС на величину α :

$$I = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha). \quad (4)$$

Амплитуда I_0 вынужденных колебаний тока связана с параметрами контура R , C , L и величиной ω соотношением:

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}}. \quad (5)$$

Амплитуда I_0 зависит от круговой частоты ω приложенной ЭДС. При некоторой частоте ω_r сила тока максимальна и равна $I_{0m} = E_0/R$.

Явление резкого увеличения амплитуды колебаний (здесь — тока I_0) при приближении частоты внешнего воздействия ω к собственной частоте ω_0 колебаний системы называется **резонансом**.

Резонансная частота ω_p совпадает с собственной круговой частотой ω_0 только при отсутствии потерь энергии в контуре. При наличии потерь $\omega_p < \omega_0$. Поскольку $\omega = 2\pi f$, где f — частота колебаний в Герцах, зависимость $I(\omega)$ можно заменить зависимостью $I(f)$ (рис. 2).

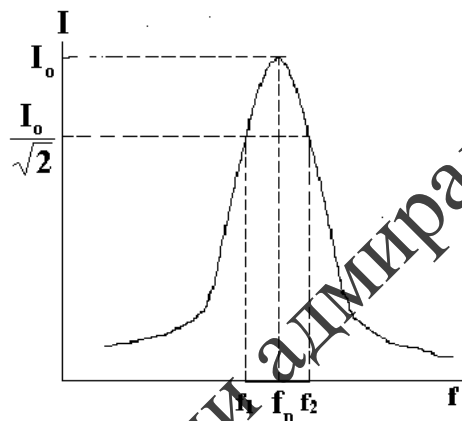


Рис. 2

При резонансе напряжение на катушке индуктивности U_L и напряжение на конденсаторе U_C максимальны, равны друг другу и противоположны по фазе. Резонанс в электрической цепи с соединёнными последовательно R , C , L называется резонансом напряжений.

Качество любой колебательной системы характеризуется её **добротностью** Q .

Для колебательного контура добротность характеризует относительные потери электромагнитной энергии в нём за счет омического сопротивления R . Добротность контура определяется уравнением:

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (6)$$

Величина $\sqrt{L/C}$ имеет размерность сопротивления и называется волновым сопротивлением контура. Оно характеризует сопротивление, которое оказывает контур распространению в нем синусоидальных колебаний.

Добротность Q определяет ширину резонансной кривой. Острота кривой характеризуется ее относительной полушириной $\Delta f = f_2 - f_1$ — разностью значений частот f_2 и f_1 , соответствующих величине $I = I_0 / \sqrt{2}$ (рис. 2).

Относительная полуширина $\Delta f/f_p$ связана с добротностью Q соотношением:

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta f}{f_p} \quad (7)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ (рис. 3)

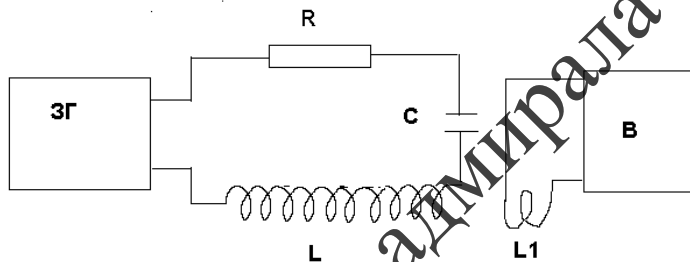


Рис. 3

Синусоидальное напряжение частоты f от звукового генератора $ЗГ$ подается на колебательный контур, содержащий последовательно соединенные сопротивление R , конденсатор C и катушку индуктивности L . С катушкой L индуктивно связана небольшая катушка L_1 , которая соединена с вольтметром переменного тока $В$. В катушке L_1 индуцируется ЭДС U , пропорциональная величине тока I_0 в контуре. Меняя частоту f подаваемой от $ЗГ$ ЭДС, можно изучать частотную зависимость I_0 в условных единицах напряжения на вольтметре.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для используемого контура значения L , C и R задаются в лаборатории.

1. Зная параметры контура, вычислить собственную частоту f_0 колебаний по формуле (2) и добротность Q по формуле (6). Результаты расчета занести в табл. 1.

2. Включить звуковой генератор и вольтметр в сеть и, вращая ручку выходного напряжения, установить предел измерения вольтметра (в делениях верхней шкалы прибора) в соответствии с указаниями преподавателя.

3. Изменяя частоту звукового генератора в пределах частот, указанных в лаборатории, определять для каждой частоты значения выходного напряжения (в делениях верхней шкалы вольтметра) с точностью до 0,5 деления шкалы. Данные занести в табл. 2.

4. Используя результаты табл. 2, на миллиметровой бумаге построить график зависимости I от f .

5. С помощью этого графика найти величины резонансной частоты колебаний f_p , значение $\Delta f = f_2 - f_1$ на высоте резонансной кривой равной $I_m/\sqrt{2}$ и вычислить добротность контура Q по формуле (7). Данные занести в табл. 3.

6. Сравнить теоретические значения собственной частоты f_0 контура и его добротности Q с экспериментально полученными данными для резонансной частоты f_p и добротности Q .

Таблица 1

L, мкГн	C, нФ	R, Ом	f_0 , кГц	Q

Таблица 2

f, кГц			и т.д.
U, дел. шк.			

Таблица 3

f_p , кГц	I_m дел. шк	$\frac{I_m}{\sqrt{2}}$	f_1 , кГц	f_2 , кГц	Δf , кГц	Q

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 48

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ И ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ДЛЯ НЕГО

Акустическая волна — это распространение в пространстве продольных колебаний плотности среды. В диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц эта волна воспринимается человеческим ухом как звук. Источниками звука являются вибрирующие тела.

Скорость распространения v колебаний, их частота f и длина волны λ и связаны соотношением:

$$v = \lambda \cdot f. \quad (1)$$

Для газообразной среды скорость v звуковой волны зависит от термодинамических параметров газа:

$$v^2 = \gamma \cdot \frac{R \cdot T}{M_m}. \quad (2)$$

$\gamma = c_p / c_v$ — показатель адиабаты, c_p и c_v — теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура газа, M_m — его молярная масса. Для воздуха, содержащего набор различных газов, принимается $M_m = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Целью работы является экспериментальное определение скорости v звуковой волны в воздухе и вычисление показателя адиабаты γ для воздуха.

Метод определения v — изучение стоячих волн, возникающих в закрытом с одной стороны звуковом резонаторе при возбуждении в нем звуковых колебаний.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

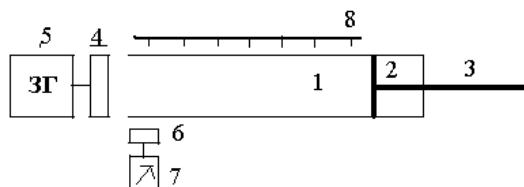


Рис.1

Звуковой резонатор (рис. 1) представляет собой стеклянную трубку 1, закрытую с одной стороны поршнем 2 на подвижном штоке 3. Шток позволяет изменять активную длину резонатора. Источником звуковых волн является малогабаритный динамик 4, подсоединенный к генератору звуковых колебаний 5 (ЗГ). Звуковые колебания на открытом конце резонатора улавливаются приемником 6 и фиксируются усилителем 7. Положение поршня внутри стеклянной трубки определяется по шкале 8.

Динамик 4 посылает звуковые колебания определенной частоты ν в стеклянный резонатор 1. Отразившись от поршня 2, звуковая волна интерферирует с падающей волной. При этом в резонаторе возникает стоячая волна. В зависимости от положения поршня внутри трубки, на ее открытом конце образуется либо узел стоячей волны (минимум амплитуды стоячей волны, т.е. минимум звука), либо ее пучность (максимум амплитуды стоячей волны, т.е. максимум звука). Схематически возникновение узла или пучности на открытом конце звукового резонатора изображено на рис. 2,а и рис. 2,б.

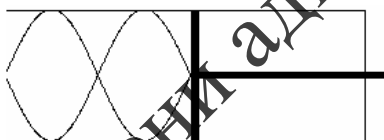


Рис.2-а

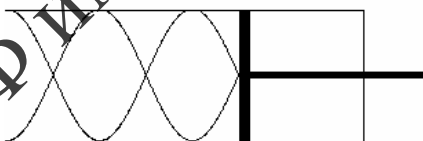


Рис.2-б

Расстояние между двумя соседними узлами либо пучностями равно половине длины звуковой волны $\lambda/2$, излучаемой динамиком. Поэтому, измерив это расстояние, можно определить длину λ звуковой волны, распространяющейся в воздухе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить установку и выдвинуть шток вправо до отказа.
2. Установить на **3Г** одну из частот f_1 звуковых колебаний, указанных преподавателем.
3. Вдвигая шток внутрь трубки, последовательно отмечать по шкале 8 положения поршня, при которых интенсивность звука на открытом конце резонатора минимальна (на слух и с помощью усилителя 7, по минимуму отклонения стрелки). Данные о положении поршня занести в табл. 1.
4. Вывести шток вправо до отказа, установить на **3Г** следующую частоту f_2 колебаний и повторить для нее все действия пункта 3. Полученные данные занести в табл. 2.
5. Повторить то же самое для третьей частоты f_3 , результаты занести в табл. 3.
6. По данным табл. 1 – 3 определить длину звуковой волны λ и ее среднее значение для каждой из частот и величину средней погрешности эксперимента $\Delta\lambda$.
7. Используя среднее значение длины λ звуковой волны для каждой из частот, по формуле (1) определить скорость распространения v волны, ее среднее значение и среднюю погрешность измерений. Данные занести в табл. 4.
8. По измеренным значениям скорости v для каждой из частот, с помощью формулы (2) определить показатель адиабаты γ для воздуха, внести результаты в табл. 4. Вычислить среднее значение γ и погрешность $\Delta\gamma$.
9. Записать окончательный результат в виде:

$$\begin{aligned} v &= (v_{cp} \pm \Delta v_{cp}) \text{ м/с} ; \\ \gamma &= \gamma_{cp} \pm \Delta \gamma_{cp} . \end{aligned} \quad (3)$$

Таблицы 1, 2, 3

f , кГц	№ п/п	Положение поршня X_i , см	$X_i - X_{i-1} =$ $\lambda/2$, см	λ , см	$\Delta\lambda$, см
	1				
	2				
	3				
	и т.д.				
				$\lambda_{\text{ср}}$	$\Delta\lambda_{\text{ср}}$

Таблица 4

№ п/п	f , кГц	v , м/с	$v_{\text{ср}}$, м/с	γ	$\Delta\gamma$
Среднее:					

Для заметок

ВО "ТУМРФ имени адмирала С.О. Макарова"

Горайнов Георгий Иванович, канд. физ-мат. наук, доцент
Горобец Александр Григорьевич, канд. физ-мат. наук, доцент
Мульганов Сергей Васильевич, старший преподаватель
Пшеницын Владимир Ильич, д-р физ-мат. наук, профессор
Сказка Всеволод Степанович, д-р хим. наук, профессор

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

**Методические указания к выполнению
лабораторных работ**



198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2
Тел.: (812) 748-97-19, 748-97-23
e-mail: izdat@gumrf.ru

Публикуется в авторской редакции

Ответственный за выпуск
Корректурa
Компьютерная верстка

Сатикова Т. Ф.
Сатикова Т.Ф.

Подписано в печать 25.12.2017
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman
Усл. печ. л. 3,75. Тираж 50 экз. Заказ № 670/17