

**А. Д. АНДРЕЕВ  
Ф. Ф. ПАВЛОВ**

# **ФИЗИКА**

**ОБУЧАЮЩИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

**ЧАСТЬ 2**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2022**



МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,  
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»  
(СПбГУТ)

---

А. Д. АНДРЕЕВ, Ф. Ф. ПАВЛОВ

# ФИЗИКА

*ОБУЧАЮЩИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ*

ЧАСТЬ 2

Учебно-методическое пособие

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2022

УДК 53(076)  
ББК 22.3я76  
А 65

Рецензент  
доцент, кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры физики СПбГУТ  
*В. Н. Алимов*

*Рекомендовано к печати  
редакционно-издательским советом СПбГУТ*

**Андреев, А. Д.**

А 65      Физика. Обучающие индивидуальные задания по выполнению лабораторных работ : учебно-методическое пособие. Часть 2 / А. Д. Андреев, Ф. Ф. Павлов ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2022. – 20 с.

Содержит обучающие индивидуальные задания по выполнению лабораторных работ в режиме дистанционного обучения к существующим в учебной лаборатории экспериментальным установкам.

Предназначено для студентов 1-го курса технических направлений подготовки всех форм обучения.

**УДК 53(076)  
ББК 22.3я76**

© Андреев А. Д., Павлов Ф. Ф., 2022  
© Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБУЧАЮЩЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1	
Определение силы тока в витках соленоида, необходимого для заданного отклонения пучка электронов .....	4
ОБУЧАЮЩЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 2	
Определение удельного заряда электрона методом магнетрона .....	6
ОБУЧАЮЩЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 3	
Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли .....	11
ОБУЧАЮЩЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 4	
Исследование магнитного поля соленоида.....	16
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	20

# ОБУЧАЮЩЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1

## Определение силы тока в витках соленоида, необходимого для заданного отклонения пучка электронов

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с лабораторной работой 4.1 «Определение удельного заряда электрона методом отклонения пучка электронов в магнитном поле», изложенной в учебно-методическом пособии по выполнению лабораторных работ «Физика. Электромагнетизм» [1]. Целью лабораторной работы было измерение удельного заряда электрона методом отклонения луча осциллографа в поперечном магнитном поле.

1. В предложенном задании необходимо решить «обратную задачу» исходя из известных величин удельного заряда электрона и параметров экспериментальной установки:

$$\frac{e}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}; b = 0,20 \text{ м};$$

$$U = 2,1 \text{ кВ}; \alpha = 0,8; n = 625 \text{ м}^{-1}.$$

Необходимо определить силу тока в витках соленоида, чтобы отклонение луча на экране осциллографа было следующим:

$$a = (10 + 0,2 \cdot N_{\text{в}}), \text{ см},$$

где  $N_{\text{в}}$  – номер варианта (последняя цифра номера студенческого билета).

3. В отчете выполненное индивидуальное задание должно отдельно содержать расчеты по формулам из пособия [1]:

- расчет скорости электрона  $v$ ;
- расчет радиуса кривизны траектории электрона  $R$ ;
- расчет индукции магнитного поля соленоида  $B$ ;
- расчет силы тока в витках соленоида для заданного отклонения луча на экране осциллографа  $I$ .

4. Все расчеты должны быть представлены в виде формулы с обозначениями, введенными в лабораторной работе, с подстановкой численных значений в системе СИ и ответами с записью не более трех значащих цифр и единицами измерений.

5. При оформлении отчета не забудьте указать Ф. И. О., номер группы и номер варианта.

6. В качестве дополнительного задания к основной работе нужно ответить в письменном (или электронном) виде на следующие вопросы.

6.1. Какой силы ток нужно пустить через витки соленоида, чтобы электроны не попали на экран осциллографа?

- 6.2. От чего зависит величина и направление силы Лоренца?
- 6.3. Почему при движении частицы в магнитном поле вектор скорости заряженной частицы меняется только по направлению, оставаясь неизменным по величине?
- 6.4. В каком случае траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле имеет вид окружности?
- 6.5. По какой траектории двигается заряженная частица в однородном магнитном поле в общем случае?

## ОБУЧАЮЩЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 2

### Определение удельного заряда электрона методом магнетрона

Порядок выполнения лабораторной работы «Определение удельного заряда электрона методом магнетрона» изложен в методических указаниях к лабораторным работам по электромагнетизму [1].

При подготовке к работе необходимо использовать методические указания к лабораторным работам по физике «Электромагнетизм» [1], изучить теоретический материал, изложенный в описании лабораторной работы 4.2 «Определение удельного заряда электрона методом магнетрона».

Основной целью работы является определение удельного заряда электрона методом измерения анодного тока в вакуумном диоде, помещенном в однородное магнитное поле, перпендикулярное радиальному электрическому полю.

Главным элементом лабораторной установки является вакуумная двухэлектродная лампа (диод) с такой же конфигурацией электрического и магнитного поля, как в магнетроне – электровакуумном приборе, используемом в качестве генератора электромагнитных колебаний сверхвысоких частот. Анод выполнен в виде цилиндра, а катодом служит нить накала, расположенная на его оси. Таким образом, в лампе создается радиальное электрическое поле. Лампа вставлена внутрь соленоида так, чтобы направление нити накала совпадало с осью соленоида, создающего поперечное магнитное поле. Если в витках соленоида протекает ток  $I_C$ , а между катодом и анодом существует ускоряющее напряжение  $U_a$ , то внутри цилиндрического анода образуются радиальное электрическое и перпендикулярное ему однородное магнитное поля [1].

#### *Порядок выполнения работы*

1. В табл. 2.1 занесены результаты измерений зависимости анодного тока  $I_a$  от величины тока в соленоиде  $I_C$  для трех значений анодного напряжения ( $U_{a1}$ ,  $U_{a2}$ ,  $U_{a3}$ ).

*Таблица 2.1*

$U_{a1} = 9 \text{ В}$		$U_{a2} = 18 \text{ В}$		$U_{a3} = 28 \text{ В}$	
$I_C, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мкА}$	$I_C, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мкА}$	$I_C, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мкА}$
0	180	0	260	0	340
15	180	15	260	20	340
35	180	35	260	35	320
40	160	50	260	50	320



$U_{a1} = 9 \text{ В}$		$U_{a2} = 18 \text{ В}$		$U_{a3} = 28 \text{ В}$	
$I_C, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мкА}$	$I_C, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мкА}$	$I_C, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мкА}$
42	150	60	220	65	280
45	140	60	160	70	260
45	110	65	120	75	220
50	80	65	100	80	140
50	60	70	80	85	100
50	40	70	40	90	60
55	20	75	20	95	40
55	20	85	0	100	20
60	0	–	–	155	0

2. Для каждого значения анодного напряжения  $U_a$  построить график зависимости анодного тока  $I_a$  от величины тока в соленоиде  $I_C$ .

3. Для каждого из трех графиков определить критическое значение тока соленоида  $I_{C \text{ кр}}$ .

Для определения величины  $I_{C \text{ кр}}$  следует взять середину участка графика между точками А и В (рис. 2.1), где график имеет наибольшую крутизну.

Оценку погрешности измерения  $I_{C \text{ кр}}$  следует определять по классу точности амперметра (см. п. 10).

4. Для каждого значения анодного напряжения определить критическое значение магнитной индукции  $B_{\text{кр}}$ , используя следующую формулу:

$$B_{\text{кр}} = \mu \mu_0 n I_{C \text{ кр}}, \quad (2.1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды ( $\mu \approx 1$ );

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная;

$n = N/l$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида;

$N = 2300$  – число витков;

$l = (10 + 0,1 \cdot N_0) \text{ см}$  – длина соленоида, где  $N_0$  – номер варианта (последняя цифра номера студенческого билета).

5. Для каждого значения анодного напряжения определить значение удельного заряда электрона  $e/m$ , используя следующую формулу:

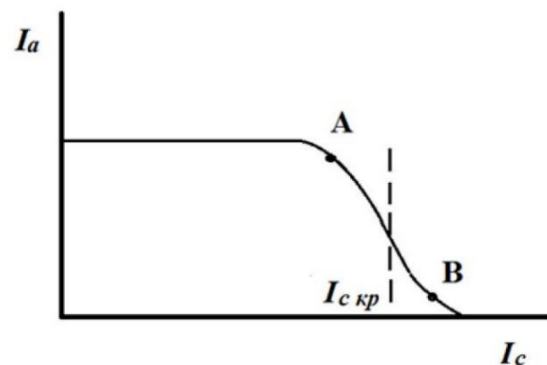


Рис. 2.1. Определение величины критического значения тока соленоида

$$\frac{e}{m} = \gamma \frac{8U_a}{B_{\text{кр}}^2 R_A^2}, \quad (2.2)$$

где  $\gamma = 0,7$  – поправочный коэффициент;

$R_A = 1,3 \cdot (1 + 0,01 \cdot \text{№})$  см – радиус анода, где № – номер варианта (последняя цифра номера студенческого билета).

Результаты занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$i$	$U_a$ , В	$I_{\text{С КР}}$ , мА	$B_{\text{кр}}$ , Тл	$e/m$ , Кл/кг
1	9			
2	18			
3	28			

6. В данной работе используется вторая методика обработки результатов измерений [2]. Для этого нужно учесть особенности второй методики.

7. Определить по формуле и записать среднее значение удельного заряда электрона:

$$\overline{(e/m)} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n=3} (e/m)_i. \quad (2.3)$$

8. Определить квадрат случайной погрешности для удельного заряда электрона по следующей формуле:

$$\left(\Delta(e/m)_\alpha\right)^2 = t_{\alpha,n}^2 \cdot \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n=3} \left((e/m)_i - \overline{(e/m)}\right)^2, \quad (2.4)$$

для  $n = 3$  и доверительной вероятности  $\alpha = 0,7$  коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha,n}$  равен 1,4.

9. Систематическую погрешность удельного заряда электрона (результата косвенного измерения) считают, применяя формулу относительной погрешности косвенного измерения к «наилучшему» опыту. При этом «наилучшим» считается тот эксперимент, в котором значение удельного заряда окажется ближе всего к вычисленному по формуле (2.3) среднему значению.

10. Для вывода формулы относительной погрешности косвенного измерения надо прологарифмировать рабочую формулу (2.2) и взять частные производные по величинам, которые в нее входят. Путем несложных вычислений окончательная формула относительной погрешности косвенного измерения принимает следующий вид:

$$\delta(e/m) = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_a}{U_a}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta I_{C\text{ КР}}}{I_{C\text{ КР}}}\right)^2}. \quad (2.5)$$

*Примечание.* По просьбе преподавателя студент должен вывести формулу (2.5).

В формулу (2.5) следует подставить значения  $U_a$  и  $I_{C\text{ КР}}$ , соответствующие «наилучшему» из 3 опытов. «Наилучшим» считается тот опыт, который дал для  $(e/m)$  самое близкое к среднему  $\overline{(e/m)}$  значение.

Для определения абсолютных погрешностей (которые совпадают с систематическими или приборными)  $\Delta U_a$  и  $\Delta I_{C\text{ КР}}$  в формуле (2.5) нужно использовать следующие данные:

- амперметр для измерения силы тока в соленоиде имеет предел измерения 300 мА, цену деления 5 мА и класс точности 1;
- вольтметр имеет предел измерения 30 В, цену деления 0,5 В и класс точности 1.

При вычислении относительной погрешности косвенного измерения для «наилучшего» опыта сохранять не более двух значащих цифр.

Далее определяем квадрат систематической погрешности:

$$\left(\Delta(e/m)_{\text{сист}}\right)^2 = \overline{(e/m)}^2 \cdot \delta(e/m)^2. \quad (2.6)$$

И, наконец, используя результаты вычислений случайной и систематической погрешностей, определяем абсолютную погрешность удельного заряда электрона:

$$\Delta(e/m) = \sqrt{(\Delta(e/m)_{\alpha})^2 + (\Delta(e/m)_{\text{сист}})^2}. \quad (2.7)$$

Находим относительную погрешность косвенного измерения и округляем ее до двух значащих цифр:

$$\delta(e/m) = \frac{\Delta(e/m)}{\overline{(e/m)}} = \dots \quad (2.8)$$

Округляем абсолютную погрешность до одной значащей цифры, которая определит точность окончательной записи удельного заряда в следующем виде:

$$(e/m) = \left(\overline{(e/m)} \pm \Delta(e/m)\right) \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}; \alpha = 0,7; \delta(e/m) = \dots \quad (2.9)$$

Отчет по работе «Определение удельного заряда электрона методом магнетрона» должен содержать:

1) Ф. И. О. студента, номер группы, Ф. И. О. преподавателя (обычно в правом верхнем углу отчета);

2) заголовок: название лабораторной работы;

3) данные измерений из табл. 2.1;

4) три графика (для каждого значения анодного напряжения  $U_a$ ) зависимости анодного тока  $I_a$  от величины тока в соленоиде  $IC$  с определением критического значения тока соленоида  $IC_{KP}$  для каждого из этих трех графиков;

5) формулы (2.1) и (2.2) с подстановкой результатов измерений и ответ, содержащий не более трех значащих цифр. Выписать постоянные величины, используемые в этих формулах;

6) заполненную табл. 2.2;

7) среднее значение и квадрат случайной погрешности для удельного заряда электрона по формулам (2.3) и (2.4);

8) результат вашего «наилучшего» опыта и рассчитанные для него относительную и систематическую погрешности удельного заряда электрона по формулам (2.5) и (2.6);

9) рассчитанные абсолютную и относительную погрешности по формулам (2.7) и (2.8);

10) величину удельного заряда электрона в стандартном виде (2.9).

## ОБУЧАЮЩЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 3

### Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли

Порядок выполнения лабораторной работы «Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли» изложен в учебно-методических указаниях к лабораторным работам по электромагнетизму [1].

При подготовке к работе необходимо использовать методические указания к лабораторным работам по физике «Электромагнетизм» [1], изучить теоретический материал, изложенный в описании лабораторной работы 4.3 «Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли».

Основной целью работы является измерение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

В данной работе используется прибор тангенс-гальванометр, который состоит из кругового проводника радиуса  $R$  в виде катушки с намотанными плотно друг к другу витками провода и компаса (рис. 3.1). Перед началом работы плоскость рамки катушки совмещается с магнитной стрелкой так, чтобы они находилась в одной плоскости. Далее нужно повернуть лимб компаса так, чтобы стрелка указывала на ноль. Это делается потому, что в обычных условиях стрелка компаса находится в плоскости магнитного меридиана и указывает на ноль. Если по катушке пропустить ток  $I$ , то возникает магнитное поле оси кругового тока, направленное вдоль оси катушки, и это поле окажется перпендикулярным магнитному полю Земли.



Рис. 3.1. Рисунок установки

Таким образом, на стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных магнитных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока. Магнитная стрелка установится в направлении результирующего вектора напряженности поля, созданного круговым током и горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

### *Порядок выполнения работы*

1. Для определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли  $H_0$  вначале устанавливают плоскость рамки катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана. Для этого магнитная стрелка должна оказаться в вертикальной плоскости витков катушки. Далее нужно зафиксировать рамку катушки в этом положении винтом и повернуть лимб так, чтобы стрелка указывала на ноль.

2. Далее приведем пример измерений. Нужно включить ток в цепи катушки и установить минимальную величину постоянного тока в витках при помощи резистора так, чтобы отклонение магнитной стрелки составляло  $25^\circ$ . Тогда силе тока будет соответствовать значение 14 мА. Значение угла  $\beta_1$  и силы тока  $I$  приведены в табл. 3.1.

3. При той же величине силы тока необходимо поменять его направление на противоположное переключателем и произвести отсчет угла  $\beta_2$ . Значение угла  $\beta_2$  получилось равным  $22^\circ$ .

Значение угла  $\beta_2$  и среднее арифметическое значений  $\beta_1$  и  $\beta_2$  приведены в табл. 3.1.

4. Увеличивая силу тока, повторить измерения для отклонений магнитной стрелки на  $36^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $65^\circ$ . Значения  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  для противоположных направлений тока и их средние значения приведены в табл. 3.1.

*Таблица 3.1*

$i$	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$\bar{\beta}$ , град
1	14	25	22	23,5
2	22	36	38	37,0
3	30	45	45	45,0
4	49	55	59	57,0
5	60	65	60	62,5

5. Далее идет задание по вариантам. Номер варианта № – последняя цифра в номере зачетной книжки (всего 10 вариантов). Значения углов  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и тока  $I$  для каждого варианта № приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

№ 0			№ 1			№ 2			№ 3			№ 4		
$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА
25	26	14	25	26	14	25	26	14	25	26	14	25	26	14
28	27	15	28	27	15	30	29	16	31	30	17	31	30	17
38	40	22	40	42	24	41	45	25	42	45	26	42	45	26
47	53	32	48	53	33	48	54	34	49	55	35	57	59	36
56	63	46	56	64	48	57	64	49	58	66	51	62	59	53
№ 5			№ 6			№ 7			№ 8			№ 9		
$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА	$\beta_1$ , град	$\beta_2$ , град	$I$ , мА
25	26	14	25	26	14	25	26	14	25	26	14	25	26	14
32	34	18	36	34	19	35	37	20	39	35	21	40	36	22
43	45	27	44	47	28	49	46	28	45	49	30	46	50	30
58	53	38	52	59	39	60	54	41	60	54	41	62	55	42
68	60	55	60	68	58	61	70	60	63	71	62	64	72	66

### Оформление отчета

1. Результаты работы представить в отчете в виде табл. 3.3, используя для расчета горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли формулу (3.1) и данные табл. 3.2.

$$H_0 = \frac{N}{2R} \frac{I}{\operatorname{tg}(\bar{\beta})}, \quad (3.1)$$

где  $N = (200 \pm 2)$  – число витков рамки;

$R = (20 \pm 0,2)$  см – радиус рамки.

Для нашего примера получаются результаты, которые приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

$i$	$I$ , мА	$\bar{\beta}$ , град	$\operatorname{tg}(\bar{\beta})$	$H_0$ , А/м
1	14	23,5	0,43	16,10
2	22	37,0	0,75	14,60
3	30	45,0	1,00	15,00
4	49	57,0	1,54	15,91
5	60	62,5	1,92	15,62

2. Вычислить среднее значение величины  $\bar{H}_0$ . В нашем примере получается  $\bar{H}_0 = 15,44$  А/м.

3. Обратите внимание, что в настоящей работе имеет место неравноточность прямых измерений (поскольку во всех опытах токи в катушке и углы различные). Очевидно, что горизонтальная составляющая магнитного поля – величина постоянная, и не зависит от того, какой ток установлен в катушке. Значения  $H_0$ , найденные для каждого опыта, должны составить выборку равноточных косвенных значений. Это позволяет использовать вторую методику обработки результатов [2]. Для этого нужно учесть особенности второй методики.

4. Вычислить отклонение

$$\Delta H_{0i} = H_{0i} - \bar{H}_0,$$

где  $i = 1-5$ ,

и квадрат этой величины –  $(\Delta H_{0i})^2$ .

5. Определить по таблице коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha,n}$  для заданной доверительной вероятности  $\alpha = 0,7$  и числа проведенных измерений  $n = 5$ .

6. Определить квадрат случайной погрешности:

$$(\Delta H_{0\alpha})^2 = (t_{\alpha,n})^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta H_{0i})^2}{n \cdot (n-1)}, \quad (3.2)$$

где  $n$  – число измерений.

В нашем случае получается:  $(\Delta H_{0\alpha})^2 = 0,11$  (А/м)<sup>2</sup>.

7. Задать абсолютные погрешности для величин  $\beta$  и  $I$  (они совпадают с приборными погрешностями):

$$\Delta\beta = \Delta\beta_{\text{сист}} = 0,5^\circ; \Delta I = \Delta I_{\text{сист}} = 0,5 \text{ мА}.$$

8. Найти квадрат систематической погрешности по формуле:

$$(\Delta H_{0\text{сист}})^2 = \bar{H}_0^2 \cdot (\delta H_0)^2. \quad (3.3)$$

При этом в формулу погрешности для

$$\delta H_0 = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\beta}{\sin(2\beta)}\right)^2} \quad (3.4)$$

следует подставлять значения  $I$  и  $\bar{\beta}$ , соответствующие «наилучшему» из пяти опытов (табл. 3.3). «Наилучшим» считается тот опыт, который дал



для  $H_0$  самое близкое к  $\bar{H}_0$  значение. В нашем случае при  $I = 60$  мА и  $\bar{\beta} = 62,5^\circ$  получается  $(\Delta H_{0\text{сист}})^2 = 0,18$  (А/м)<sup>2</sup>.

*Примечание.* По просьбе преподавателя студент должен вывести формулу (3.4).

9. Найдите полную абсолютную погрешность искомой величины:

$$\Delta H_0 = \sqrt{(\Delta H_{0\alpha})^2 + (\Delta H_{0\text{сист}})^2}. \quad (3.5)$$

Округлите результат до одной значащей цифры. В нашем случае получается  $\Delta H_0 = 0,2$  А/м.

10. Найдите полную относительную ошибку:

$$\delta H_0 = \frac{\Delta H_0}{\bar{H}_0}. \quad (3.6)$$

11. Запишите окончательный результат:

$$H_0 = (\bar{H}_0 \pm \Delta H_0) \text{ А/м; } \alpha = 0,7; \delta H_0 = \dots \quad (3.7)$$

Для нашего примера получаем следующее:

$$H_0 = (15,4 \pm 0,2) \text{ А/м; } \alpha = 0,7; \delta H_0 = 0,01.$$

**Отчет по работе «Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли» должен содержать:**

- 1) Ф. И. О. студента, номер группы, Ф. И. О. преподавателя (обычно в правом верхнем углу отчета);
- 2) заголовок: название лабораторной работы;
- 3) данные прямых равноточных измерений  $I$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  из табл. 3.2 в зависимости от варианта выполнения работы;
- 4) рабочую формулу (3.1) с подстановкой результатов прямых равноточных измерений и ответ, содержащий не более трех значащих цифр. Выписать постоянные величины, используемые в рабочей формуле (3.1);
- 5) заполненную табл. 3.3;
- 6) квадрат случайной погрешности для горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли, рассчитанный по формуле (3.2);
- 7) результат вашего «наилучшего» опыта, рассчитанный для него квадрат систематической погрешности горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли по формулам (3.3) и (3.4);
- 8) абсолютную и относительную погрешности, определенные по формулам (3.5) и (3.6);
- 9) величину горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли, записанную в стандартном виде (3.7).

## ОБУЧАЮЩЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 4

### Исследование магнитного поля соленоида

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с лабораторной работой 4.5 «Исследование магнитного поля соленоида» по учебно-методическому пособию по выполнению лабораторных работ «Физика. Электромагнетизм» [1], целью которой является исследование магнитного поля длинного соленоида и сопоставление экспериментальных результатов с теоретически рассчитанными значениями магнитной индукции на оси соленоида.

Ниже приведен частично оформленный протокол к лабораторной работе 4.5 с обозначениями параметров и данных, снятых на лабораторной установке в лаборатории физики.

В таблице измерительных приборов последний столбец (абсолютная погрешность) должен быть заполнен студентом самостоятельно (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Название прибора	Цена деления	Предел измерения	Класс точности	Абсолютная погрешность
Амперметр	0,02 А	2 А	0,5	
Линейка	1 мм	250 мм	–	0,5 мм
Баллистический гальванометр	1 дел.	100 дел.	1	

1. Установим в соленоиде ток:

$$I = [1,0 + 0,1 \cdot (1 + N_0)] \text{ А},$$

где  $N_0$  – номер варианта (последняя цифра номера студенческого билета).

2. В основе экспериментальной части работы – измерение зависимости отклонения светового «зайчика» баллистического гальванометра  $n_0$  при включении и выключении тока в витках соленоида от координаты положения измерительной катушки слева ( $x_{л}$ ) и справа ( $x_{п}$ ) относительно середины соленоида.

**Примечание.**  $\bar{n}_0$  для левой и правой частей соленоида должны быть идентичны (ввиду симметрии измерения). Поэтому логично ограничиться измерениями и расчетами, связанными с одной из половинок соленоида.

В табл. 4.2 приведены результаты измерений и расчетов для левой половины соленоида.

Таблица 4.2

$x_{л}, \text{ см}$	$n_0, \text{ дел.}$			$\bar{n}_0, \text{ дел.}$
	1	2	3	
0	20	19	21	
5,0	19	20	21	
9,0	16	17	16	
12,0	13	13	14	
13,0	12	12	12	
14,0	11	11	11	
14,9	10	10	10	

3. По результатам измерений (табл. 4.2) определить и записать в табл. 4.3 среднеарифметическое (из трех) значение отброса светового «зайчика» гальванометра  $\bar{n}_0$  и абсолютную погрешность  $\Delta\bar{n}_0$ , рассчитываемую по формуле

$$\Delta\bar{n}_0 = \sqrt{\Delta n_{\alpha}^2 + \Delta n_{\text{приб}}^2},$$

где  $\Delta n_{\alpha} = t_{\alpha, n}^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^3 (n_{0i} - \bar{n}_0)^2}{6}$  – случайная погрешность;

$t_{\alpha, n} = 1,4$  – коэффициент Стьюдента (для заданной доверительной вероятности  $\alpha = 0,7$  и числа проведенных измерений, равных трем);

$\Delta n_{\text{приб}}$  – приборная погрешность, определяющаяся из данных табл. 4.1.

Таблица 4.3

$x_{л}, \text{ см}$	$l_1, \text{ см}$	$l_2, \text{ см}$	$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_1$	$B_{\text{теор}}, \text{ Тл}$	$\bar{n}_0, \text{ дел.}$	$\Delta\bar{n}_0, \text{ дел.}$	$B_{\text{эксп}}, \text{ Тл}$
0								
5,0								
9,0								
12,0								
13,0								
14,0								
14,9								

4. Для расчета магнитной индукции по экспериментальным данным  $B_{\text{эксп}}$  по формуле

$$B_{\text{эксп}} = \frac{4b_0 \bar{n}_0 R_K}{\pi d^2 N_K} \quad (4.1)$$

потребуется знание величин, указанных на рабочем месте:

– баллистическая постоянная гальванометра

$$b_0 = [1,0 + 0,1 \cdot (1 + N_0)] \cdot 10^{-7} \text{ Кл/дел.},$$

где  $N_0$  – номер варианта (последняя цифра номера студенческого билета);

– число витков измерительной катушки  $N_k = 2390$ ;

– суммарное сопротивление цепи (катушка и сопротивление гальванометра) измерительной катушки  $R_k = (160 \pm 1) \text{ Ом}$ ;

– внутренний диаметр соленоида  $d = (12,0 \pm 0,5) \text{ мм}$ .

Усредненное значение отклонения «зайчика» баллистического гальванометра  $\bar{n}_0$  указано в табл. 4.2.

5. Результаты вычислений  $B_{\text{эксп}}$  следует записать в соответствующий столбец табл. 4.3.

6. Отдельно для одного из значений  $x$  (например, для  $x_{\text{л}} = 5 \text{ см}$ ) привести пример вычисления  $B_{\text{эксп}}$  с подстановкой численных значений в системе СИ в формулу (4.1) и ответом с записью не более трех значащих цифр и единицей измерения.

7. В основе теоретической части работы – расчет магнитной индукции с использованием формул (4.2), (4.3) и (4.4).

Сначала следует рассчитать величины

$$l_1 = (0,5 \cdot l - x_{\text{л}}) \text{ см}$$

и

$$l_2 = (0,5 \cdot l + x_{\text{л}}) \text{ см},$$

которые характеризуют место исследования магнитного поля соленоида относительно его середины (см. рис. 1 в [1]).

Длина соленоида  $l = l_{\text{сол}} = (298 \pm 1) \text{ мм}$ .

Рассчитайте значения  $l_1$  и  $l_2$  для всех значений  $x_{\text{л}}$ , соответствующих табл. 4.2, и запишите в табл. 4.3.

8. Вычислите значения  $\cos \varphi_1$  и  $\cos \varphi_2$ :

$$\cos \varphi_1 = + \frac{l_1}{\sqrt{R^2 + l_1^2}}, \quad (4.2)$$

$$\cos \varphi_2 = - \frac{l_2}{\sqrt{R^2 + l_2^2}}, \quad (4.3)$$

где радиус круглого сечения соленоида  $R = d/2 = 6 \text{ мм}$ .

Результаты вычислений запишите в табл. 4.3.

9. Пользуясь данными табл. 4.3, вычислите теоретические значения магнитной индукции

$$B_{\text{теор}} = \frac{\mu\mu_0 n I}{2} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (4.4)$$

для всех значений  $x_{\text{Л}}$  и запишите в табл. 4.3. При этом магнитная проницаемость воздуха  $\mu \approx 1$ ; число витков соленоида  $N = 288$ ; плотность намотки витков соленоида  $n = N/l$ .

10. Отдельно для одного из значений  $x$  (например, для  $x_{\text{Л}} = 5$  см) приведите пример вычисления  $B_{\text{теор}}$  с подстановкой численных значений в системе СИ в формулу (4.4), ответом с записью не более трех значащих цифр и единицей измерения.

11. Представьте графически зависимости  $B_{\text{теор}}$  и  $B_{\text{эксп}}$  от  $x_{\text{Л}}$  на одном листе миллиметровой бумаги.

12. Оцените относительные и абсолютные погрешности вычислений по формулам

$$\delta B_{\text{теор}} = \frac{\Delta I}{I}, \quad (4.5)$$

$$\delta B_{\text{эксп}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \bar{n}_0}{\bar{n}_0}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d}{\bar{d}}\right)^2} \quad (4.6)$$

для середины соленоида ( $\bar{x} = 0$ ).

Абсолютная погрешность амперметра определяется из табл. 4.1.

**Отчет по работе «Исследование магнитного поля соленоида» должен содержать:**

1) Ф. И. О. студента, номер группы, Ф. И. О. преподавателя (обычно в правом верхнем углу отчета);

2) заголовок: название лабораторной работы;

3) заполненные табл. 4.1–4.3;

3) данные установки с значениями силы тока в соленоиде и баллистической постоянной для вашего варианта;

4) примеры расчетов  $B_{\text{эксп}}$ ,  $B_{\text{теор}}$  относительной и абсолютной погрешностей для середины соленоида;

5) два графика –  $B_{\text{эксп}}(x)$  и  $B_{\text{теор}}(x)$  – на одном листе.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Андреев, А. Д.* Физика. Электромагнетизм : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ / А. Д. Андреев [и др] ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2017.

2. *Андреев, А. Д.* Физика. Обработка результатов измерений в физическом практикуме : конспект лекций / А. Д. Андреев, Л. М. Черных ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2009.

**Андреев Александр Давидович  
Павлов Федор Федорович**

**ФИЗИКА**

**ОБУЧАЮЩИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

**ЧАСТЬ 2**

Редактор *Е. В. Пирогова*  
Компьютерная верстка *Н. А. Ефремовой*

План издания 2022 г., п. 72

Подписано к печати 14.03.2022  
Объем 1,25 печ. л. Тираж 12 экз. Заказ 1323  
Редакционно-издательский отдел СПбГУТ  
193232 СПб., пр. Большевиков, 22  
Отпечатано в СПбГУТ

