

№ 2520

Физика

Электричество и магнетизм

Лабораторный практикум

№ 2520

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра физики

Физика

Электричество и магнетизм

Лабораторный практикум

Под редакцией профессора Е.Б. Черепецкой

Рекомендовано учебно-методической комиссией
в качестве учебного пособия для студентов направления
подготовки (специальности) «Физические процессы
горного или нефтегазового производства»



Москва 2015

УДК 537
Ф50

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. *Ю.К. Фетисов*;
д-р техн. наук, проф. *В.Л. Шкуратник*

Авторы:

Л.Н. Экономова, Л.В. Мудрецова, И.И. Логачёв, Р.З. Муратов

Физика : электричество и магнетизм : лаб. практикум. Ч. II /
Ф50 Л.Н. Экономова [и др.] ; под ред. Е.Б. Черепецкой. – М. : Изд.
Дом МИСиС, 2015. – 110 с.
ISBN 978-5-87623-878-8

Лабораторный практикум содержит описания экспериментальных работ по курсу «Электричество и магнетизм». Материал представлен в объеме, достаточном для самостоятельной подготовки к допуску, практическому выполнению, обработки экспериментальных данных и теоретической защиты работ.

Предназначен для студентов всех направлений подготовки, обучающихся на кафедре физики.

УДК 537

ISBN 978-5-87623-878-8

© Коллектив авторов, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| Предисловие..... | 4 |
| Тема. Электростатическое поле в вакууме..... | 6 |
| Лабораторная работа Э.1. Графическое моделирование электростатических полей | 6 |
| Тема. Проводники и диэлектрики в электрическом поле..... | 22 |
| Лабораторная работа Э.2. Определение диэлектрических проницаемостей различных веществ | 22 |
| Тема. Магнитостатическое поле в вакууме..... | 40 |
| Лабораторная работа Э.3. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля земли..... | 40 |
| Тема. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях | 51 |
| Лабораторная работа Э.4. Определение удельного заряда электрона | 51 |
| Тема. Явление электромагнитной индукции | 65 |
| Лабораторная работа Э.5. Экспериментальный метод изучения магнитных полей различной конфигурации..... | 65 |
| Тема. Нестационарные электромагнитные поля | 77 |
| Лабораторная работа Э.6. Определение взаимных индуктивностей электропроводящих катушек | 77 |
| Тема. Магнитостатическое поле в веществе | 89 |
| Лабораторная работа Э.7. Изучение магнитных свойств ферромагнетика | 89 |
| Библиографический список..... | 108 |
| Приложение..... | 109 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

В начале каждой работы изложены теоретические аспекты темы, которые необходимы для понимания физической сути выполняемой работы.

Особое внимание уделено экспериментальному исследованию изучаемого явления: поставлена цель эксперимента и раскрыта его физическая идея; описана используемая аппаратура; даны рисунки и схемы; указаны способы наблюдений; приведена методика измерений; выведены расчетные формулы, необходимые для получения окончательного результата; изложен подробный поэтапный план проведения упражнения, требования по обработке результатов измерений и оценки их погрешности. В конце каждой работы приведены вопросы для самоконтроля знаний по данной теме.

Методические указания студентам для получения допуска к лабораторной работе

I. **Внимание!** График выполнения лабораторных работ индивидуален для каждого звена и его необходимо строго соблюдать в течение семестра.

II. Иметь тонкую тетрадь, в которой в соответствии с требованиями, изложенными в лабораторном практикуме к части I «Механика», подготовлено оформление для выполнения работы по графику заданий звеньев группы.

III. Подготовиться самостоятельно к выполнению работы. Для этого знать ответы на следующие вопросы:

1. Цель работы и ее окончательный результат.
2. Используемое в работе физическое явление и его суть.
3. Определения физических величин и законов, используемых при выполнении эксперимента.
4. Расчетные формулы и экспериментальные методы определения всех параметров в них входящих.
5. Описание составных частей экспериментальной установки.
6. Приборы и устройства, необходимые для выполнения поставленной цели; их назначение.
7. Понимание предложенных в упражнениях принципиальных схем.
8. Последовательность действий каждого лабораторного упражнения; их содержание и конечный результат.
9. Правила построения и оформления требуемых графиков по экспериментальным данным.

10. Оценка случайных абсолютной и относительной ошибок экспериментов. Правила округления среднего результата в соответствии с погрешностью опыта. Представление окончательных результатов, полученных в лабораторной работе.

Тема. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Лабораторная работа Э.1

Графическое моделирование электростатических полей

1.1. Цель работы

Для постоянных электрических полей, созданных различными конфигурациями распределений зарядов, произвести экспериментальное графическое построение эквипотенциальных линий и восстановить по их виду карты силовых линий.

1.2. Теоретическое введение

Электрический заряд. Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции

Электрический заряд является физической величиной, характеризующей интенсивность электромагнитного взаимодействия.

В природе существует два вида электрических зарядов, условно названных «положительными» и «отрицательными». Причем одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются друг к другу.

Единица измерения заряда – кулон; его размерность $[q] = A \cdot c = Кл$.

Все заряды кратны **элементарному**. Наименьшим по величине (элементарным) зарядом является заряд электрона, модуль которого равен заряду протона:

$$|-e| = +p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Протоны и электроны входят в состав атомов любого вещества. В атоме алгебраическая сумма зарядов равна нулю, т.е. атомы нейтральны. Любая электрически нейтральная система содержит одинаковое количество зарядов разных знаков (положительных и отрицательных).

Заряд системы равен сумме зарядов, составляющих систему:

$$Q = \sum_i q_i.$$

Для описания физических явлений, происходящих с заряженными телами, обычно рассматривают две модели.

I. Модель точечного заряда, в которой размерами заряда q можно пренебречь по сравнению с расстояниями до других заряженных тел или до заданной точки пространства.

Точечные заряды q_1 и q_2 взаимодействуют между собой с силой \vec{F} , которая описывается экспериментально полученным законом Кулона:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{r^2 r}, \quad (1.1)$$

где $\left(\frac{\vec{r}}{r}\right)$ – единичный вектор, который указывает направление век-

тора силы \vec{F} , здесь r – расстояние между зарядами;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ – электрическая постоянная в СИ,

а $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$;

$\epsilon \geq 1$ – диэлектрическая проницаемость среды, причем в воздухе и в вакууме $\epsilon = 1$.

Закон Кулона (1.1) позволяет найти и величину, и направление силы, действующей со стороны одного заряда на другой. Пусть сила \vec{F}_{12} действует со стороны заряда 2 на заряд 1, как показано, например, на рис. 1.1.

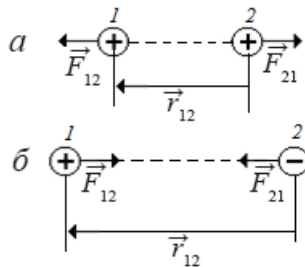


Рис. 1.1

Тогда в законе (1.1) вектор $\vec{r} = \vec{r}_{12}$ и направлен от заряда 2 к заряду 1. Учитывая это, из закона (1.1) получаем: при совпадении направле-

ния вектора \vec{F}_{12} с направлением \vec{r}_{12} , когда $[(\pm q_1) \cdot (\pm q_2)] > 0$, **одноименные** заряды **отталкиваются** (рис. 1.1, *a*) и **разноименные** заряды $[(\pm q_1) \cdot (\mp q_2)] < 0$ **притягиваются** (рис. 1.1, *б*), поскольку направление вектора \vec{F}_{12} противоположно направлению \vec{r}_{12} .

Опыт показывает, что взаимодействие зарядов осуществляется на расстоянии без непосредственного контакта. Поэтому в классической физике для описания действия одних зарядов на другие используют модель **электрического поля**, которое существует вокруг каждого заряда. Векторным полем (гравитационным, электрическим, магнитным) считают некоторую область пространства, в каждой точке M которого задан определенный вектор $\vec{A}(M)$: сила тяжести $\vec{F}(\vec{r})$, напряженность $\vec{E}(\vec{r})$ или магнитная индукция $B(\vec{r})$.

Для обнаружения и изучения электрического поля можно использовать пробный заряд q' , который помещают в любую точку электрического поля, созданного зарядом q , считаящимся источником поля.

По величине силы \vec{F} , действующей на пробный заряд q' , судят об «интенсивности» или «величине» поля. Если использовать пробные заряды разной величины, то и величины сил, действующих на них в одной и той же точке поля, будут отличаться. Однако отношение $\left(\frac{\vec{F}}{q'}\right)$ одинаково в данной точке, не зависит от величины внешнего заряда q' , а значит, характеризует само поле. Эта векторная (силовая) характеристика, равная

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'}, \quad (1.2)$$

называется **напряженностью электрического поля**. Напряженность – основная силовая характеристика электрического поля.

Напряженность равна отношению силы, действующей на пробный заряд, помещенный в данную точку электрического поля, к величине этого заряда.

Определение (1.2) можно трактовать и так: напряженность в любой точке электрического поля по величине и направлению совпадает с силой, действующей на единичный положительный ($q' = +1$ Кл) заряд, помещенный в данную точку поля.

Напряженность – векторная величина. Ее размерность из определения (1.2) – $[E] = \text{Н/Кл}$.

Из равенств (1.1) и (1.2) следует, что в вакууме напряженность поля, созданного точечным зарядом q на расстоянии r от него, равна

$$\vec{E}_{\text{точ.зар}} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{r}. \quad (1.3)$$

Поля, созданные неподвижными зарядами, называются электростатическими. Физические параметры (напряженность, потенциал), описывающие такие поля, не зависят от времени, но могут меняться по величине и направлению от точки к точке пространства.

Заметим, если во всех точках некоторой области пространства вектор напряженности электрического поля остается постоянным $\vec{E}(\vec{r}) = \text{const}$, т.е. сохраняет неизменным свое направление и абсолютную величину, то в этой области пространства электростатическое поле является **однородным**.

Если электрическое поле создано системой нескольких электрических зарядов, то в любой точке пространства происходит **суперпозиция** (наложение) полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности. Этот закон называется **принципом суперпозиции** полей.

Для напряженности принцип суперпозиции гласит: напряженность электрического поля, создаваемая системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей \vec{E}_i , создаваемых каждым зарядом в отдельности, т.е.

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i. \quad (1.4)$$

Электрические поля могут создаваться не только точечными зарядами, но и заряженными телами. При этом используют другую модель.

II. Модель непрерывного распределения заряда по отрезку, поверхности или объему.

Для этой модели распределение зарядов характеризуют величинами его линейной – τ , поверхностной – σ или объемной – ρ плотностями, которые соответственно равны

$$\tau = \frac{dq}{dl}; \quad \sigma = \frac{dq}{dS}; \quad \rho = \frac{dq}{dV}. \quad (1.5)$$

Для такой модели выражение (1.3) будет иметь вид

$$d\vec{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r} = \frac{\rho dV}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

а принцип суперпозиции должен использоваться в виде

$$\vec{E} = \vec{i} \int dE_x + \vec{j} \int dE_y + \vec{k} \int dE_z, \quad (1.6)$$

где $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$.

(Метод решения задач с помощью принципа суперпозиции и примеры решений изложены в теме 1 [5].)

Теорема Гаусса. I уравнение Максвелла для электростатического поля

Для электростатического поля выполняется **теорема Гаусса** [1–3], которая записывается так:

$$\oint_S (\vec{E} d\vec{S}) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i. \quad (1.7)$$

Теорема (1.7) гласит: поток вектора [5] напряженности через любую замкнутую (кружок на знаке интеграла) поверхность S равен алгебраической сумме зарядов, заключенных внутри этой поверхности, деленной на ϵ_0 . Если зарядов внутри поверхности Гаусса нет, то

$$\oint_S (\vec{E} d\vec{S}) = 0.$$

Заметим, что для электростатического поля в вакууме, созданного телом, равномерно заряженным с объемной плотностью ρ , теорема Гаусса (1.7) запишется так:

$$\oint_S (\vec{E} d\vec{S}) = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{V_S} \rho dV. \quad (1.8)$$

Интеграл справа от знака равенства представляет заряд, заключенный в объеме V_S , который ограничен замкнутой поверхностью Гаусса S .

Равенство (1.8) является **I уравнением Максвелла** для электростатического поля. Его **физический смысл**: электрические поля создаются электрическими зарядами (покоящимися и движущимися). То есть в при-