

3. Лабораторная работа № 21

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цели работы:

- 1) экспериментально исследовать квазистационарное электрическое поле, построить картину эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности этого поля;
- 2) определить значение модуля напряженности электрического поля в указанных точках.

Приборы и принадлежности:

- 1) электролитическая ванна;
- 2) источник переменного напряжения;
- 3) потенциометр с зондом.

Подготовка к работе

По лекциям и приведенному ниже списку литературы изучите следующие вопросы:

- 1) закон Кулона;
- 2) понятие электрического поля;
- 3) напряженность электрического поля, линии напряженности;
- 4) потенциал электрического поля, эквипотенциальные линии;
- 5) связь между напряженностью поля и потенциалом.

Вопросы для допуска к работе

1. Что называется напряженностью электрического поля?
2. Что такое силовая линия электрического поля?

3. Что называется потенциалом электростатического поля?
4. Как расположены друг относительно друга в пространстве линии напряженности и эквипотенциальные поверхности?
5. Как связаны между собой напряженность и потенциал в данной точке?
6. Каковы условия равновесия зарядов на проводнике в электростатическом поле?

Теоретическое введение

Электрическое поле возникает в пространстве при наличии заряженных тел. Неподвижные заряды создают поле, которое называется электростатическим. В природе существуют электрические заряды двух знаков: положительные «+» и отрицательные «-», это наименование условно. Наименьшим зарядом обладают элементарные частицы, например: электрон – частица, входящая в состав атома, – имеет отрицательный заряд $-e$ (здесь $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – «элементарный заряд»), а протоны входящие в состав ядра атома, заряжены положительно ($+e$). Заряды одинакового знака отталкиваются друг от друга, заряды противоположных знаков – притягиваются.

По закону Кулона, силы взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2 направлены вдоль прямой, их соединяющей, прямо пропорциональны величинам зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния r_{12} между зарядами:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12}, \quad (3.1)$$

где \vec{e}_{12} – единичный вектор, направленный от одного заряда к другому,
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная,
 ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Эти силы являются центральными и, следовательно, консервативными.

Силовое действие зарядов можно определить с помощью так называемого пробного заряда $+q_0$, который является точечным и достаточно малым по величине, чтобы не вносить существенных искажений в имеющееся в пространстве силовое поле, созданное системой зарядов.

Отношение силы, действующей на пробный заряд, к величине этого заряда не зависит от величины заряда и называется *напряженностью электростатического поля*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (3.2)$$

Напряженность \vec{E} – векторная величина, ее направление совпадает с направлением силы \vec{F} , действующей на пробный положительный заряд q_0 , находящийся в данной точке пространства.

Электростатическое поле можно представить графически с помощью системы силовых линий, начинающихся на положительных зарядах, а заканчивающихся на отрицательных или уходящих на бесконечность. Вектор напряженности \vec{E} в каждой точке силовой линии направлен по касательной к ней и совпадает с ней по направлению. Густота силовых линий характеризует модуль вектора $|\vec{E}|$.

Сила, действующая на произвольный точечный заряд, помещенный в данную точку поля, определяется произведением величины этого заряда на напряженность электростатического поля в данной точке

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}. \quad (3.3)$$

Работа консервативных сил по перемещению заряда в электростатическом поле не зависит от траектории движения, а определяется лишь начальным и конечным положением заряда, эта работа

может быть выражена через изменение потенциальной энергии со знаком «-»:

$$A_{12} = -\Delta W = W_1 - W_2. \quad (3.4)$$

Потенциальная энергия W заряда q_0 в электростатическом поле может быть выражена через энергетическую характеристику этого поля, называемую *потенциалом* φ , как произведение $W = q \cdot \varphi$, следовательно, разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2) = -\Delta\varphi$ между точками 1 и 2 можно определить через отношение работы сил поля A_{12} к величине заряда q

$$-\Delta\varphi = \frac{A_{12}}{q}. \quad (3.5)$$

При бесконечно малом перемещении \vec{dl} заряда q силой \vec{F} в произвольном направлении совершается элементарная работа $dA = \vec{F} \cdot \vec{dl}$. Тогда из (3.5), с учетом (3.3), получим, что для электростатического поля малая разность потенциалов связана с напряженностью выражением

$$d\varphi = -\frac{dA}{q} = -\frac{F \cdot dl \cdot \cos\alpha}{q} = -\frac{E \cdot q \cdot dl \cdot \cos\alpha}{q} = -E \cdot \cos\alpha \cdot dl = -E_{dl} \cdot dl, \quad (3.6)$$

где $E_{dl} = E \cdot \cos\alpha$ – проекция вектора \vec{E} на перемещение \vec{dl} .

Следовательно,

$$E_{dl} = -\frac{d\varphi}{dl}. \quad (3.7)$$

В декартовой системе вектор напряженности электростатического поля может быть выражен через свои проекции E_x , E_y , E_z на оси x , y , z соответственно:

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}, \quad (3.8)$$

где \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} – орты координатных осей.

Из математического определения частной производной функции многих переменных, применительно к функции $\varphi(x, y, z)$ и уравнения (3.7) следует

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (3.9)$$

Это означает, что напряженность электростатического поля в любой точке может быть выражена через градиент потенциала в этой точке:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \right) = -\text{grad } \varphi. \quad (3.10)$$

Напомним, что градиентом функции в векторной алгебре называется вектор, проекции которого на координатные оси равны частным производным от данной функции по соответствующим координатам. Градиент функции направлен в сторону ее наиболее быстрого возрастания, поэтому формула (3.10) показывает, что вектор напряженности направлен в сторону максимального убывания потенциала.

Поверхности равного потенциала $\varphi = \text{const}$ называются *эквипотенциальными*. Из соотношения (3.6) следует, что при перемещении заряда вдоль эквипотенциальной поверхности ($d\varphi = 0$) работа электростатического поля равна нулю, и это возможно только в том

случае, когда вектор напряженности \vec{E} перпендикулярен этой поверхности ($\cos \alpha = 0$). Следовательно, силовые линии электростатического поля пересекают эквипотенциальные поверхности под прямым углом (рис. 3.1).

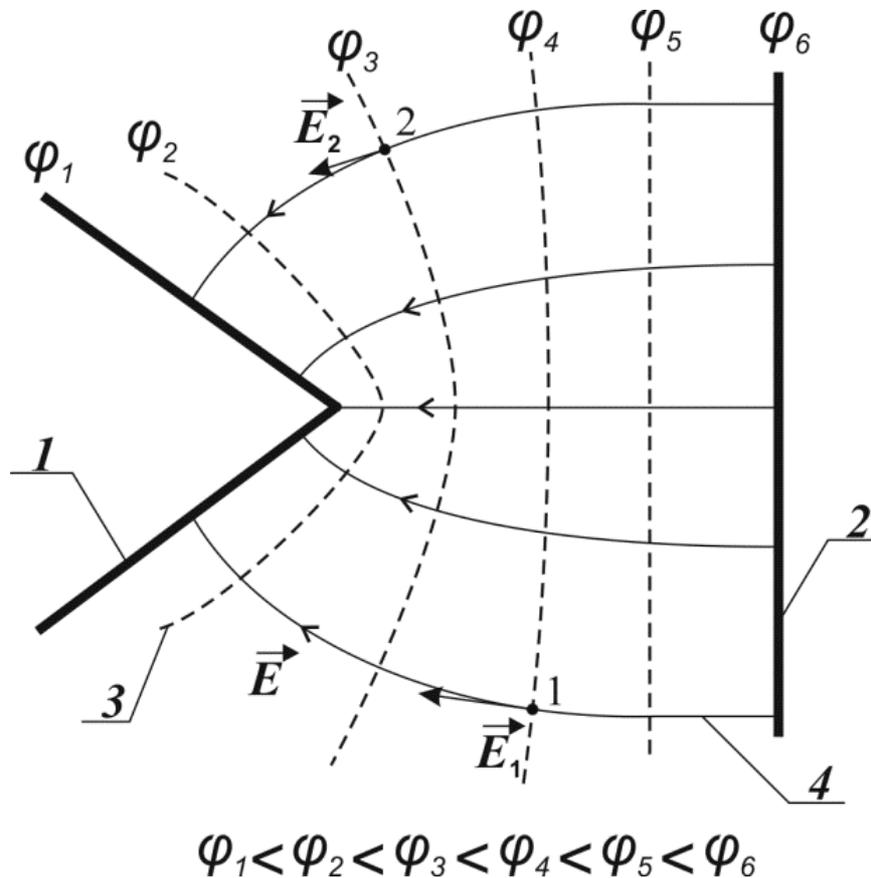


Рис. 3.1. Взаимное расположение в пространстве силовых линий и эквипотенциальных поверхностей:

1, 2 – проводники; 3 – эквипотенциальная поверхность;
4 – линия напряженности

Внутри проводника всегда имеются свободные заряженные частицы, поэтому при внесении проводника во внешнее электростатическое поле положительные заряды $+q$ начинают двигаться в направлении вектора \vec{E} , а отрицательные – в противоположную сторону, на поверхности проводника образуются так называемые индуцирован-

ные заряды. Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю. Перераспределение зарядов внутри проводника будет происходить до тех пор, пока не будут выполнены следующие условия:

$$\begin{aligned} \text{а) } \vec{E}_{\text{вн}} &= 0; \\ \text{б) } \vec{E}_{\text{пов}} &= \vec{E}_n, \end{aligned} \tag{3.11}$$

то есть: а) напряженность электрического поля внутри проводника равна 0; б) на поверхности проводника существует только нормальная составляющая электрического поля \vec{E}_n . Следовательно, поверхность проводника является эквипотенциальной и линии напряженности внешнего электрического поля перпендикулярны этой поверхности (см. рис. 3.1).

Электрическое поле, напряженность которого одинакова во всех точках:

$$\vec{E}(x, y, z) = \text{const},$$

называют *однородным*. Очевидно, что линии напряженности такого поля представляют собой параллельные прямые. Соответственно, эквипотенциальными поверхностями будут перпендикулярные к ним параллельные плоскости. Однородное поле возникает, например, между двумя бесконечными параллельными плоскими заряженными проводниками (рис. 3.2). Напомним, что такая система проводников называется плоским конденсатором.

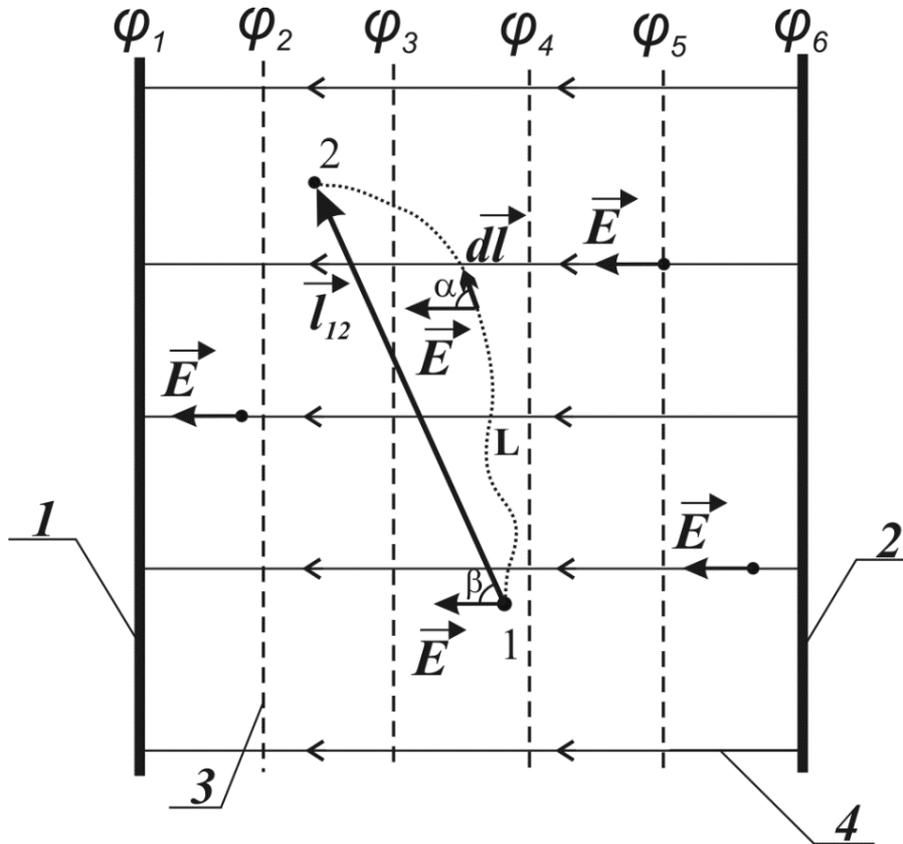


Рис. 3.2. Однородное электрическое поле:

1, 2 – бесконечные параллельные проводники; 3 – эквипотенциальная поверхность; 4 – линия напряженности

В однородном поле очень легко проинтегрировать уравнение (3.6), чтобы получить разность потенциалов между любыми двумя точками 1 и 2. Если учесть, что постоянный вектор напряженности \vec{E} можно вынести за знак интеграла, как любой постоянный множитель, то, интегрируя по произвольному пути \mathbf{L} (см. рис. 3.2), получим:

$$\Delta\varphi_{12} = -\int_1^2 E \cdot \cos\alpha \cdot dl = -\int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\vec{E} \cdot \int_1^2 d\vec{l} = -\vec{E} \cdot \vec{l}_{12} = -E \cdot l_{12} \cdot \cos\beta, \quad (3.12)$$

где \vec{l}_{12} – вектор, проведенный от точки 1 к точке 2;

β – угол между векторами \vec{E} и \vec{l}_{12} .

Если точки 1 и 2 лежат на одной линии напряженности, то есть векторы \vec{E} и \vec{l}_{12} параллельны, то угол $\beta = 0$ или 180° , и формула (3.12) превращается в

$$|\Delta\varphi_{12}| = E \cdot l_{12}. \quad (3.13)$$

Эта формула позволяет приближенно вычислить напряженность электрического поля в точке, в окрестности которой оно мало отличается от однородного. Достаточно провести через данную точку линию напряженности и измерить вдоль нее расстояние l_{12} между ближайшими эквипотенциальными поверхностями с потенциалами φ_1 и φ_2 , после чего найти величину напряженности по формуле

$$E = \frac{|\Delta\varphi_{12}|}{l_{12}}. \quad (3.14)$$

Экспериментальная установка

Изучение электростатического поля состоит в определении величины и направления вектора напряженности \vec{E} . Но на практике гораздо проще исследовать пространственное распределение потенциалов $\varphi = \varphi(x, y, z)$, построить картину эквипотенциальных поверхностей, и, используя взаимную перпендикулярность линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей, воссоздать картину силовых линий электростатического поля.

В данной лабораторной работе (рис. 3.3) исследуется *квазистационарное электрическое поле*, которое возникает в слабопроводящей среде (водопроводная вода), в которую помещены электроды – металлические проводники, подсоединенные к источнику переменного напряжения. Так как проводимость такой среды намного меньше проводимости проводника, то поверхность проводника с большой степенью точности можно считать эквипотенциальной, при этом то-

пография поля в пространстве между электродами будет аналогична топографии электростатического поля заряженных проводников в непроводящей среде. Известно, что водопроводная вода содержит в небольших количествах молекулы солей металлов, которые в электрическом поле распадаются на ионы металлов и ионы оснований, и, в дальнейшем, могут выделяться в виде осадка вблизи электродов. Для исключения такого электролиза используется переменное напряжение U_{\sim} , с частотой 50 Гц. В этом случае внутри электролитической ванны, между электродами, возникает квазистационарное электрическое поле с распределением потенциалов, аналогичным случаю электростатического поля неподвижных заряженных тел. Токи, возникающие в слабопроводящей среде, тоже являются переменными, и мы измеряем действующее значение этих токов.

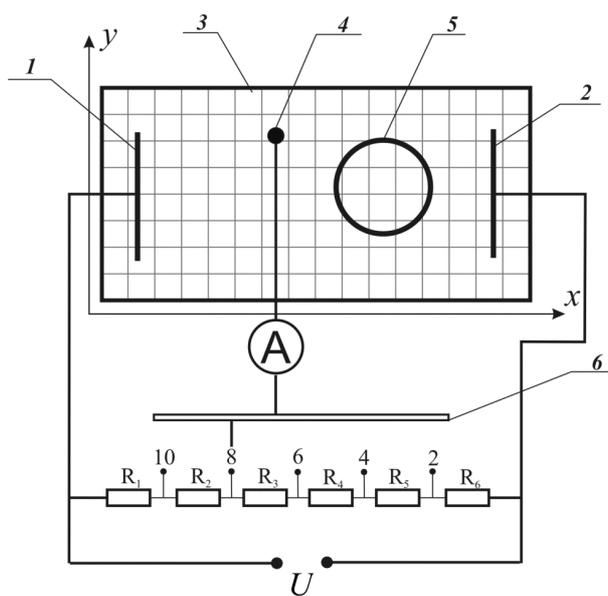


Рис. 3.3. Схема лабораторной установки для исследования электростатического поля:

1, 2 – электроды; 3 – электролитическая ванна; 4 – зонд; 5 – металлическое тело; 6 – переключатель потенциометра

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Согласуйте с преподавателем расположение электродов в электролитической ванне и подключите электроды к разъемам лабораторной установки.

2. Налейте воду в электролитическую ванну и включите установку в сеть переменного напряжения.

3. Начертите на тетрадном листе в клетку схему расположения электродов в масштабе, точно воспроизведя при этом координатную сетку, имеющуюся на дне ванны.

4. Переключатель потенциометра установите в положение «2 В» и опустите зонд в электролитическую ванну. Во всех точках с тем же потенциалом показание амперметра, включенного последовательно, будет минимально. С помощью зонда необходимо определить положение нескольких (8–10) точек указанного потенциала и координаты этих точек перенести на схему.

5. Переведите переключатель потенциометра в последующие положения «4В, 6В,...» и определите координаты точек других потенциалов.

6. Постройте картину эквипотенциальных линий, соединив на схеме точки одинаковых потенциалов.

7. Используя свойство взаимной перпендикулярности линий напряженности и эквипотенциальных линий, постройте картину силовых линий электрического поля с указанием направления вектора \vec{E} .

8. По требованию преподавателя поместите между электродами предложенное им металлическое тело и повторите пункты 3–7, сделав чертеж на новом листе. Сравните результаты с предыдущим опытом.

9. Определите значение модуля напряженности электрического поля в указанных преподавателем точках.

Контрольные вопросы

1. Если известно, что напряженность электрического поля в какой либо точке равна нулю, значит ли это, что потенциал в этой точке равен нулю?

2. Почему при внесении незаряженного проводника в электрическое поле изменяется картина силовых линий?

3. В чем заключается метод моделирования электрического поля в среде со слабым электролитом?

4. Куда направлена действующая на ионы кулоновская сила внутри ванны с электролитом? Покажите на схеме с указанными силовыми линиями.

Список литературы

1. Тюшев А. Н., Вайсберг А. И. Курс лекций по физике : учеб. пособие. Ч. 2. Электричество и магнетизм. – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 10–39.

2. Трофимова Т. И. Курс физики : учеб. пособие. – М. : Академия, 2015. – Гл. 11.

3. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика [Электронный ресурс] : учеб. пособие. – СПб. : Лань, 2016. – 500 с. – Режим доступа : http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=71761 - §§1-9, 18.