

ИЗУЧЕНИЕ ТОПОГРАФИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: экспериментальное нахождение пространственного распределения потенциала и напряженности электростатического поля в зависимости от формы электродов и их расположения.

Приборы и принадлежности: установка для исследования электростатического поля (электроды, проводящая среда, клеммы, соединительные провода), источник питания, передвижной зонд.

Объект измерений: потенциал и напряженность электростатического поля.

Средства измерений: вольтметр постоянного тока, линейка.

Теоретическая часть

Электростатическим полем называют электрическое поле, созданное зарядами, неподвижными в данной системе отсчета.

Основными характеристиками электрического поля являются вектор напряженности \vec{E} и потенциал φ .

Напряженность электрического поля \vec{E} это векторная физическая величина, измеряемая отношением силы \vec{F} , с которой электрическое поле действует на помещенный в данную точку неподвижный положительный пробный электрический заряд q_0 , к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Напряженность является силовой характеристикой поля. Единицей измерения напряженности в СИ является 1 В/м.

В каждой точке поля направление вектора напряженности \vec{E} совпадает с направлением вектора силы \vec{F} , действующей на

помещенный в данную точку неподвижный положительный пробный электрический заряд q_0 (рис. 1).

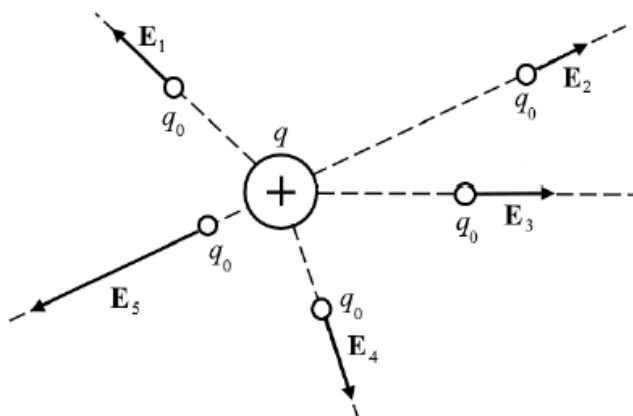


Рис. 1. Линии напряженности электрического поля от точечного заряда

Электрическое поле можно задать, указав для каждой точки величину и направление вектора \vec{E} . Совокупность этих векторов образует поле вектора напряженности электрического поля. Очень наглядно электрическое поле можно описать с помощью силовых линий.

Силовая линия – это кривая, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля (рис. 2).

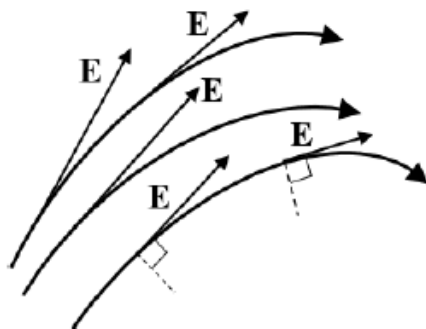


Рис. 2. Силовые линии электростатического поля

Густота линий выбирается так, чтобы количество линий, пронизывающих единицу поверхности, перпендикулярной к ним, было пропорционально численному значению вектора \vec{E} .

Силовым линиям приписывается направление: они начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном (или уходят в бесконечность), либо приходят из бесконечности и заканчиваются на отрицательном заряде.

Силовые линии не пересекаются между собой. Это следует из определения вектора как однозначной силовой характеристики каждой точки поля. В электростатическом поле силовые линии перпендикулярны поверхности проводника, так как заряды вдоль поверхности проводника не перемещаются. Таким образом, по картине силовых линий можно судить о направлении и величине вектора \vec{E} в разных точках пространства.

Так как электрические силы являются центральными, работа силы, действующей на точечный заряд q_0 в электрическом поле, при его перемещении не зависит от формы траектории, а зависит лишь от начального и конечного положения заряда. Такие поля называются *потенциальными*, и работа по перемещению заряда q_0 из точки 1 в точку 2 может быть представлена как разность значений потенциальных энергий W_{Π} , которыми обладал заряд q_0 в точках 1 и 2:

$$A_{12} = W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2} \quad (1)$$

Потенциальная энергия пропорциональна величине заряда q_0 , перемещаемого в данном поле, а отношение потенциальной энергии к величине заряда не зависит от величины q_0 и поэтому характеризует само электрическое поле.

Потенциалом φ данной точки электростатического поля называется скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии W_{Π} , которой обладает положительный пробный точечный электрический заряд q_0 , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q_0} \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2), можно записать, что разность потенциалов между точками 1 и 2 электрического поля определяется выражением:

$$\varphi = \frac{W_{П1} - W_{П2}}{q_0} = \frac{A_{12}}{q_0},$$

т. е. разность потенциалов равна отношению работы по перемещению заряда q_0 из точки 1 в точку 2 к величине этого заряда.

Как и потенциальная энергия, потенциал электрического поля зависит от выбора точки, в которой потенциал считается равным нулю. Такой точкой условились считать точку, удаленную от заряда на бесконечность. Тогда $\varphi_2 = 0$ и

$$\varphi_1 = \frac{A_{1\infty}}{q_0}. \quad (3)$$

Следовательно, потенциал данной точки поля равен отношению работы, совершенной силами электрического поля, по перемещению пробного точечного заряда q_0 из данной точки поля в бесконечность (или в точку поля, для которой потенциал условно принято считать равным нулю) к величине переносимого заряда.

Потенциал является скалярной величиной, положительной или отрицательной в зависимости от знака работы (пробный заряд q_0 условились всегда брать положительным). Из выражения (3) следует, что потенциалы всех точек вокруг положительного заряда положительны, вокруг отрицательного — отрицательны.

Потенциал является энергетической характеристикой электрического поля. Единицей потенциала в СИ является $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

Для графического изображения электростатического поля, кроме *силовых линий*, используют *эквипотенциальные поверхности*.

Эквипотенциальная поверхность — это поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал. Уравнение эквипотенциальной поверхности имеет вид:

$$\varphi(x, y, z) = \text{const}.$$

Эквипотенциальные поверхности условились проводить таким образом, чтобы разность потенциалов для двух соседних поверхностей была всюду одна и та же. На плоском рисунке изображают *эквипотенциали* — линии пересечения эквипотенциальных поверхностей с плоскостью чертежа.

Напряженность электрического поля \vec{E} и потенциал φ связаны между собой. Действительно, в потенциальном поле консервативных сил взаимосвязь силы \vec{F} и потенциальной энергии W_{Π} имеет вид

$$\vec{F} = -\text{grad } W_{\Pi}.$$

Разделив обе части этого равенства на q_0 , получим

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi,$$

где $\text{grad } \varphi$ – вектор, который называется «градиент потенциала φ ». Знак «минус» указывает на то, что вектор \vec{E} направлен в сторону убывания потенциала.

Градиент функции $\varphi(x, y, z)$ в декартовой системе координат имеет вид

$$\text{grad } \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k},$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы, т. е. орты соответствующих координатных осей; $\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ – частные производные потенциала.

Для произвольного направления работа сил электростатического поля на малом перемещении $d\vec{l}$ пробного заряда q определяется как

$$dA = (d\vec{E}, d\vec{l}) = qEdl \cos \alpha = qE_l dl, \quad (4)$$

где E_l – проекция вектора \vec{E} на направление перемещения $d\vec{l}$, α – угол между векторами \vec{E} и $d\vec{l}$.

С другой стороны, работа электростатического поля приводит к убыванию потенциальной энергии

$$dA = -dW_{\Pi} = -qd\varphi. \quad (5)$$

Из соотношений (4) и (5) следует, что

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl}, \quad (6)$$

т. е. проекция вектора напряженности электростатического поля на произвольное направление равна быстрой убывания потенциала в этом направлении.

При перемещении по эквипотенциальной поверхности на отрезок dl потенциал не изменяется ($d\varphi = 0$). Тогда согласно (6)

касательная к поверхности, составляющая вектор \vec{E} , равна нулю. Отсюда вытекает, что силовые линии вектора напряженности электростатического поля в каждой точке перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям (рис. 2).

Из условия перпендикулярности силовых линий и эквипотенциальных поверхностей следует, что для графического описания поля достаточно каким-либо образом определить положение только эквипотенциальных поверхностей и затем, пользуясь этим условием, построить силовые линии. В качестве примера на рис. 3 представлены эквипотенциали (пунктирные) и силовые линии (сплошные) для поля двух точечных зарядов. При одновременном использовании эквипотенциалей и силовых линий картина поля становится более наглядной.

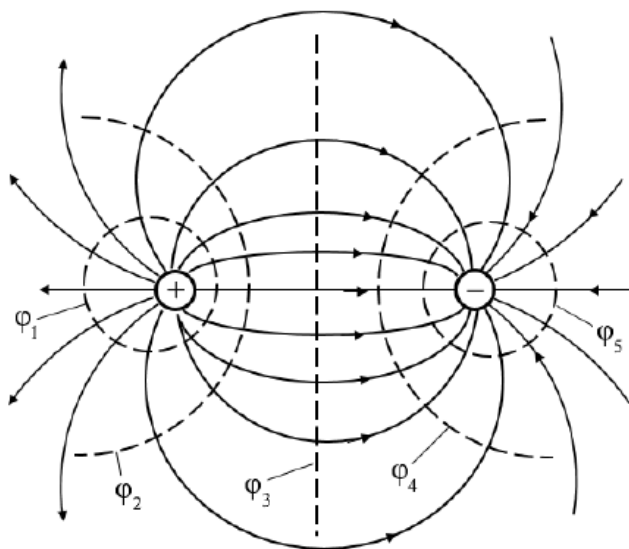


Рис. 3. Графическое изображение электростатического поля эквипотенциалами и силовыми линиями

Можно математически решить задачу о распределении в пространстве вектора напряженности \vec{E} и потенциала ϕ , найдя аналитические зависимости \vec{E} и ϕ как функции координат (x, y, z) .

Однако математический расчет электрического поля, создаваемого несколькими заряженными телами сложной конфигурации, иногда трудно осуществить. В таких случаях, моделируя реальные условия, находят распределение электрического поля опытным путем. При этом следует помнить, что графическое изображение в таких случаях часто является плоским, так как проводятся только те силовые линии, которые лежат в плоскости чертежа.

Таким образом, если известно распределение эквипотенциальных поверхностей в данном поле, то можно получить его изображение с помощью силовых линий, и наоборот. Следовательно, можно получить наглядную картину распределения электрического поля, т. е. топографию электрического поля.

Методика проведения измерений и описание установки

В данной работе проводится моделирование электростатического поля, создаваемого металлическими моделями электродов, помещенных в среду с небольшой проводимостью. Необходимо опытным путем выявить расположение эквипотенциалей для заданного вида электродов и затем построить эти линии вместе с силовыми линиями поля.

На рис. 4 показана фотография экспериментальной установки.

Установка представляет собой проводящее стекло **1** с жестко закрепленными на нем металлическими электродами **2** и клеммами (**10-1**, **10-2** и **10-3**) для подключения к источнику питания **3**. Передвижной зонд **4** для определения координат точек с заданным потенциалом подключается к вольтметру **5** для контроля величины потенциала при нахождении соответствующей координаты. Диапазоны напряжений на вольтметре устанавливаются клавишами **6**. Режим регулировка напряжения осуществляется тумблером **7**. Установка рабочего напряжения осуществляется ручками **8** («грубо», «точно»). Клемма **9** – подключение зонда к вольтметру.

Порядок выполнения работы

1. С помощью тумблера **7** установить рабочий режим напряжений 5-15 В.

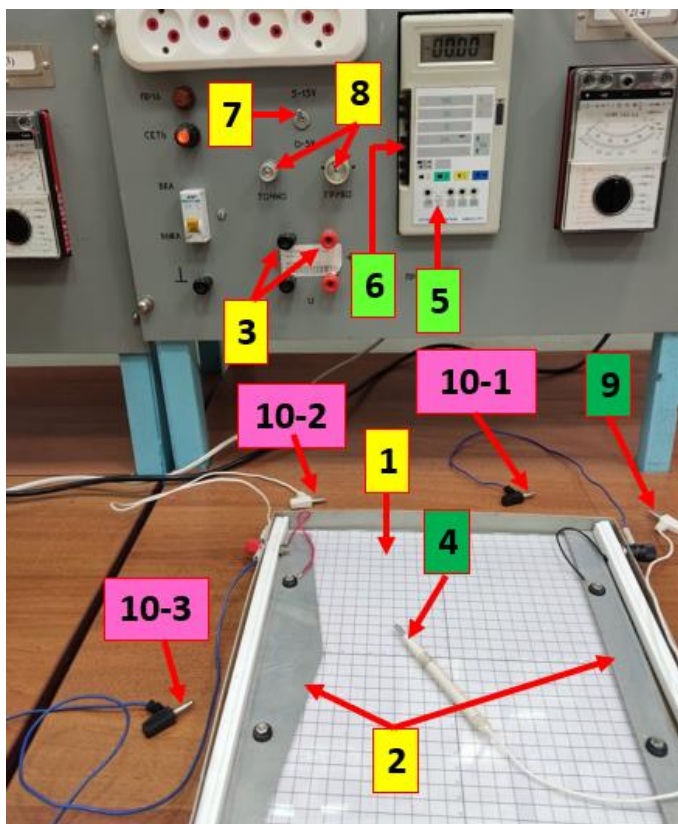


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки

2. С помощью клавиш **6** установить диапазон напряжений на вольтметре 20 В.

3. Подключить электроды к источнику напряжения и вольтметру, а также зонд к вольтметру по схеме на рис. 5.

4. Внести в таблицу заданные преподавателем значения φ .

Таблица

Заданные значения потенциала моделируемого поля

$\varphi_1, \text{В}$	$\varphi_2, \text{В}$	$\varphi_3, \text{В}$	$\varphi_4, \text{В}$	$\varphi_5, \text{В}$

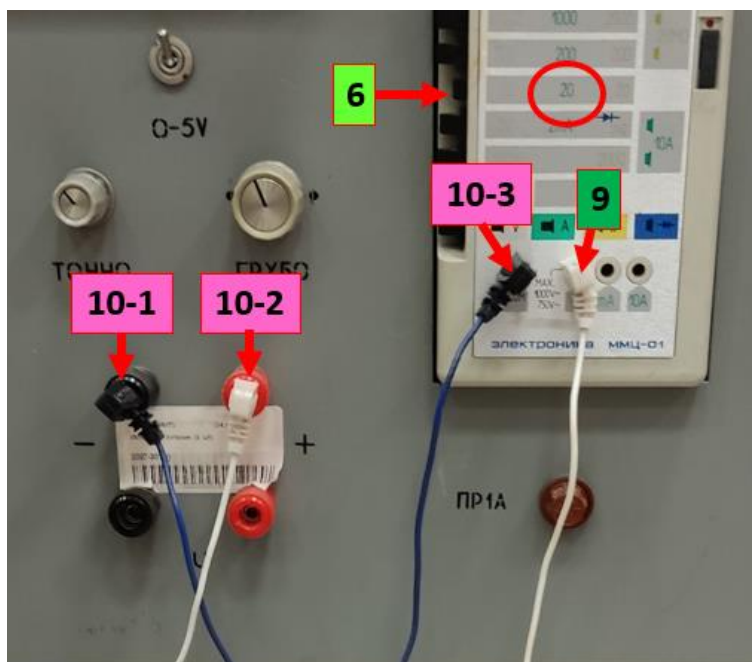


Рис. 5. Подключение электродов

5. На рабочий лист (странице № 3 рабочей тетради) нанести контуры электродов 2 по их координатам на координатной сетке под проводящим слоем.

6. Для каждого значения потенциала из таблицы снять координаты эквипотенциалей моделируемого поля и нанести их на рабочий лист. При проведении эксперимента следует соблюдать следующие правила.

6.1. Передвижной зонд 4 необходимо держать строго вертикально, как показано на рис. 6.

6.2. Значения потенциала контролируется с помощью табло вольтметра 5.

6.3. Для каждой эквипотенциали необходимо снять не менее 7 точек: снимать нужно с середины поля, а затем снять три точки вправо и три точки влево от центральной. Пример рабочего листа с экспериментальными точками показан на рис. 7.

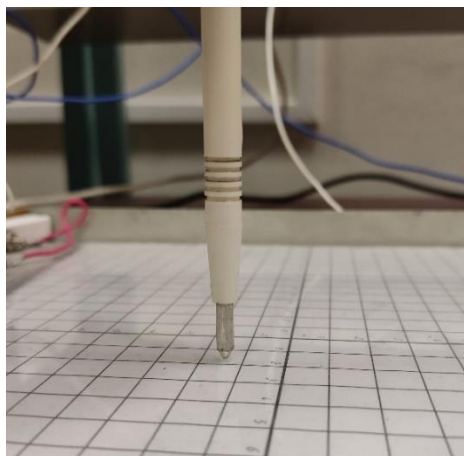


Рис. 6. Положение подвижного зонда в эксперименте

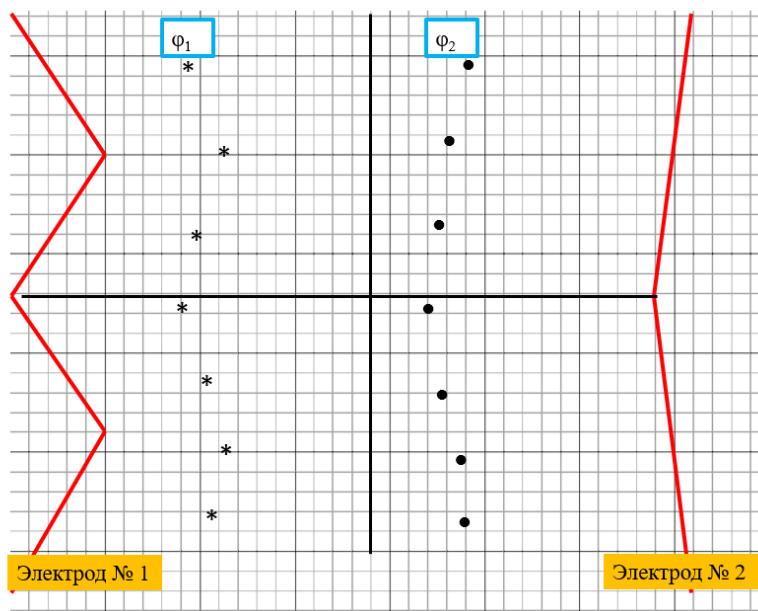


Рис. 7. Пример рабочего листа

7. Построить эквипотенциальные линии по нанесенным точкам и на каждой отметить соответствующее ей значение потенциала. Показать заполненный рабочий лист преподавателю.

Обработка результатов измерений

1. Построить приближенную картину силовых линий поля с учетом того, что силовые линии перпендикулярны эквипотенциалам и контурам электродов. Построить не менее пяти силовых линий. Определить направление вектора напряженности электрического поля и указать его на графике. Пример обработки рабочего листа показан на рис. 8.

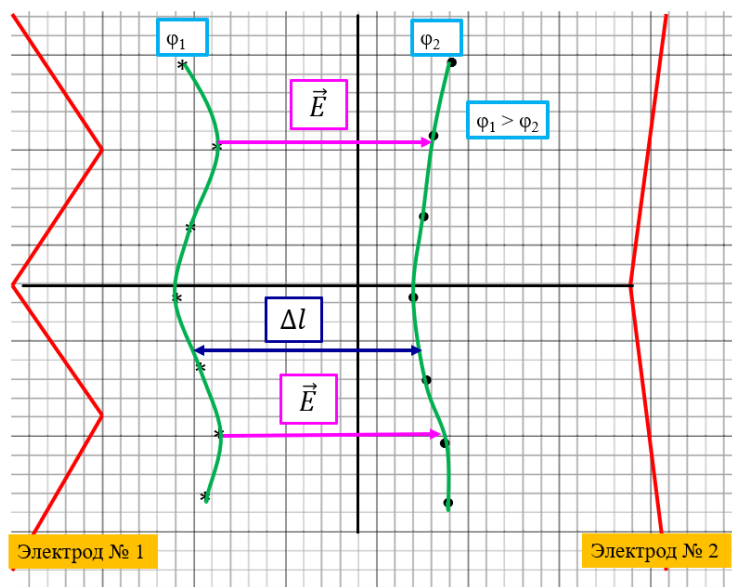


Рис. 8. Пример обработки рабочего листа

2. Выполнить расчет напряженности электрического поля вдоль одной из силовых линий между эквипотенциалами, заданными преподавателем, по формуле:

$$E_i = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}, \quad (7)$$

где Δl – расстояние между двумя эквипотенциалами, которое необходимо измерить линейкой. Расчет провести для произвольных пяти точек на эквипотенциали.

Определить среднее значение напряженности электрического поля:

$$\langle E \rangle = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n}, \quad (8)$$

где n – число экспериментальных точек. Итоговый результат представить в системе СИ.

3. Найти относительную погрешность измерения напряженности электростатического поля:

$$\delta E = \frac{\Delta \varphi_{\text{пр}}}{\Delta \varphi_{ij}} + \frac{\Delta l_{\text{пр}}}{\Delta l_{ij}}, \quad (9)$$

где: $\Delta \varphi_{\text{пр}}$ – приборная погрешность цифрового вольтметра; $\Delta l_{\text{пр}}$ – приборная погрешность линейки; Δl_{ij} – расстояние между эквипотенциальными поверхностями. Разность потенциалов определяется по формуле:

$$\Delta \varphi_{ij} = |\varphi_i - \varphi_j|. \quad (10)$$

4. Найти абсолютную погрешность измерения ΔE :

$$\Delta E = \delta E \cdot \langle E \rangle. \quad (11)$$

5. Записать окончательный ответ в виде:

$$E = (\langle E \rangle \pm \Delta E) \text{ В/м}$$

Контрольные вопросы

1. Что называется электростатическим полем? Укажите основные характеристики электростатического поля.
2. Что называется напряженностью электрического поля? В каких единицах она измеряется?
3. Что называется потенциалом электрического поля?
4. Как связаны между собой напряженность поля и потенциал?
5. Нарисуйте сечение эквипотенциальных поверхностей поля точечного заряда, поля равномерно заряженной плоскости и плоского конденсатора.

6. Перечислите свойства силовых линий электростатического поля.
7. Чему равна работа перемещения заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
8. Дайте определение силовой линии. Какое направление имеет силовая линия?
9. Какое поле называется однородным? Как связаны между собой напряженность поля и потенциал в случае однородного поля?
10. Как рассчитать напряженность однородного электрического поля?

Рекомендуемая литература

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учебное пособие для вузов / И. В. Савельев. – 16-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 500 с.
2. Трофимова Т.И. Фирсов А.В. Курс физики в 2-х томах. – Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика. Электродинамика – М.: Кнорус, 2015. – 584 с.