

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М. Лидер

« ___ » _____ 2016 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № ПК-08-2

ЛИНИИ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЕЙ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Общая физика» по теме «Электричество и магнетизм»
для студентов всех направлений и специальностей

Томск-2016

УДК 53 (076.5)

Линии эквипотенциалей. Методические указания к выполнению лабораторной работы № ПК-08-2 по курсу «Общая физика» по теме «Электричество и магнетизм» для студентов всех направлений и специальностей.

Составитель Т.Н. Мельникова
 В.А. Стародубцев

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры общей физики 2016 г.

Зав. кафедрой ОФ: А.М. Лидер.



ЛИНИИ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЕЙ

Цель работы: применение принципа суперпозиции для нахождения потенциала системы точечных зарядов, знакомство с картиной эквипотенциалей и распределения силовых линий поля одного, двух и трех зарядов.

Приборы и принадлежности: персональный компьютер.

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Направление *силовой линии* (линии напряженности) в каждой точке совпадает с направлением \vec{E} . Отсюда следует, что *напряженность \vec{E} равна разности потенциалов U на единицу длины силовой линии.*

Именно вдоль силовой линии происходит максимальное изменение потенциала. Поэтому всегда можно определить \vec{E} между двумя точками, измеряя U между ними, причем тем точнее, чем ближе точки. В однородном электрическом поле силовые линии – прямые. Поэтому здесь определить \vec{E} наиболее просто:

$$E = \frac{U}{l}. \quad (8.2.1)$$

Энергетическую характеристику электрического поля выражает потенциал φ . Его численное значение определяется величиной работы перемещения единицы положительного точечного заряда из бесконечности в данную точку электрического поля (8.2.2).

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q}. \quad (8.2.2)$$

Смысл такого выбора граничных условий в том, что при $R \rightarrow 0$ сила электростатического взаимодействия стремится к нулю и начальное значение потенциальной энергии системы "на бесконечности" можно принять за нулевое. Выполненная работа является мерой изменения потенциальной энергии системы. Поэтому можно записать:

$$W_{\Pi} = q\varphi. \quad (8.2.3)$$

Эта формула выражает величину потенциальной энергии W заряда q в данной точке электрического поля. По умолчанию, пробный заряд всегда положительный. При его приближении к точечному

отрицательному заряду потенциальная энергия системы уменьшается от начального нулевого значения.

Поэтому потенциал поля отрицательного заряда меньше нуля (отрицателен).

Зависимости потенциальной энергии и потенциала от расстояния r между зарядами (пробным q и создающим поле точечным Q) выражаются следующими формулами:

$$W(r) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}. \quad (8.2.4)$$

$$\varphi(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}. \quad (8.2.5)$$

Для электростатического поля справедлив принцип суперпозиции потенциалов, т.е. потенциал системы зарядов равен алгебраической сумме потенциалов отдельных зарядов:

$$\varphi(r) = \varphi_1(r) + \varphi_2(r) + \dots + \varphi_i(r). \quad (8.2.6).$$

Уравнение эквипотенциальных поверхностей имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = \text{const}. \quad (8.2.7)$$

При нахождении результирующего значения $\varphi(r)$ необходимо учитывать знак потенциалов, создаваемых точечными зарядами в данной точке пространства.

Все точки, расположенные на одинаковом расстоянии от точечного заряда, имеют одинаковые значения потенциала. Это следствие выше приведенной формулы (8.2.5).

Геометрическое место точек с равными потенциалами называют *эквипотенциальной поверхностью*. Для одного точечного заряда эквипотенциальными поверхностями являются концентрические сферы. В координатных плоскостях сечениями таких поверхностей будут эквипотенциальные окружности. Для нескольких точечных зарядов линии эквипотенциалей имеют более сложную форму. Карта эквипотенциалей $\varphi_i(r)$ для системы зарядов аналогична топографической карте с указанными значениями изовысот местности. Нулевая эквипотенциаль, в такой аналогии, играет роль уровня моря на географической карте. Большим положительным значениям потенциала соответствуют "горы" потенциального "рельефа", отрицательным соответствуют "впадины".

Линии эквипотенциалей и линии напряженности вектора E взаимно перпендикулярны. При этом, линии E могут пересекать

нулевую эквипотенциаль, а эквипотенциаль с отличным от нуля значением потенциала может проходить через точки, где $E = 0$.

Графическое изображение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей показано на рисунке 1.

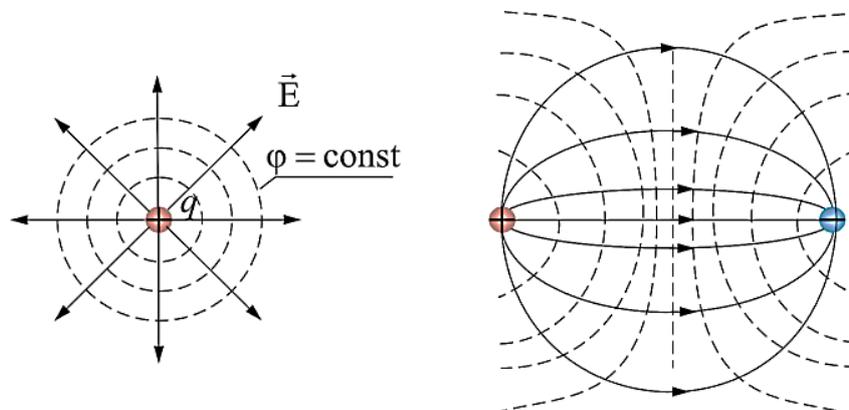


Рис. 1

При перемещении по этой поверхности на dl потенциал не изменится: $d\varphi = 0$.

Отсюда следует, что проекция вектора \vec{E} на dl равна нулю, то есть $E_t = 0$. Следовательно, \vec{E} в каждой точке **направлена по нормали к эквипотенциальной поверхности**.

Эквипотенциальных поверхностей можно провести сколько угодно много. По густоте эквипотенциальных поверхностей можно судить о величине \vec{E} , это будет при условии, что разность потенциалов между двумя соседними эквипотенциальными поверхностями равна постоянной величине.

Связь между напряженностью электростатического поля и потенциалом можно выразить с помощью понятия градиента потенциала.

Градиент (потенциала) – вектор, показывающий направление наибольшего роста скалярной функции $\varphi(x, y, z)$:

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

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – координатные орты.

Формула $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$ позволяет по известным значениям φ найти напряженность поля в каждой точке. Можно решить и обратную задачу, т.е. по известным значениям \vec{E} в каждой точке поля найти разность потенциалов между двумя произвольными точками поля. Для этого

воспользуемся тем, что работа, совершаемая силами поля над зарядом q при перемещении его из точки 1 в точку 2, может быть, вычислена как:

$$A_{12} = q \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}).$$

С другой стороны, работу можно представить в виде:

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad \text{тогда } \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}).$$

Интеграл можно брать по любой линии, соединяющие точку 1 и точку 2, ибо работа сил поля не зависит от пути. Для обхода по замкнутому контуру $\varphi_1 = \varphi_2$ получим:

$$\oint (\vec{E} d\vec{l}) = 0,$$

т.е. пришли к известной нам теореме о циркуляции вектора напряженности: *циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль любого замкнутого контура равна нулю.*

Поле, обладающее этим свойством, называется потенциальным.

Из обращения в нуль циркуляции вектора \vec{E} следует, что линии \vec{E} электростатического поля не могут быть замкнутыми: они начинаются на положительных зарядах (истоки) и на отрицательных зарядах заканчиваются (стоки) или уходят в бесконечность (рис. 3.4).

Это соотношение верно только для электростатического поля. Поле движущихся зарядов не является потенциальным, и для него это соотношение не выполняется.

2. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Часть 2. Линии эквипотенциалей системы точечных зарядов.

Эта часть может выполняться как самостоятельная работа, для ее вызова выберите в меню опцию Потенциал.

1. Включите компьютер.
2. Зайдите под своим логином и паролем.
3. Откройте папку «Виртуальные лабораторные работы», расположенную на рабочем столе.
4. Откройте файл «ПК-08-2. Линии эквипотенциалей». Если при открытии файла у вас появятся какие-то неведомые символы вместо привычных русских или английских слов, поменяйте кодировку одновременным нажатием клавиш «Alt» и «Enter».

Задание 1. Эквипотенциали точечного заряда.

1. Введите следующие значения параметров моделирования:

$$Q_1 = 2 \text{ нКл}; Q_2 = 0 \text{ нКл}; Q_3 = 0 \text{ нКл};$$

$$Z_1 = 0; X_1 = 0,5 \text{ см}; X_2 = 1 \text{ см}.$$

Значение первой потенциала $P = 10 \text{ кВ}$; $DP = -2 \text{ кВ}$.

Шаг сканирования $S = 0,006 \text{ см}$; $MZ = 0,8$; $Z_0 = -0,7$; $X_0 = -0,5$.

Проверьте введенные значения и нажмите клавишу «Enter».

2. Полученные результаты занесите в отчет. Для этого найдите на клавиатуре компьютера клавишу «PrintScreen». Нажмите ее, чтобы изображение экрана компьютера было скопировано. Затем откройте заготовку отчета по работе и с помощью клавиш «Ctrl» + «V» вставьте в него изображение экрана. Уменьшите его по своему усмотрению и обрежьте, используя команды редактора Word «Работа с рисунками» и «Обрезка». Укажите возле потенциалов (начиная с ближайшей к заряду) значения $\varphi = 10; 8; 6; 4; 2 \text{ кВ}$.

3. Чтобы определить цену деления шкалы X и Z , рассчитайте, на каком расстоянии от точечного заряда $Q = 2 \text{ нКл}$ потенциал будет равен 2 кВ . Для нахождения r преобразуйте формулу (8.9), полагая $\varepsilon = 1$ и $(1/4\pi\varepsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ Ф/м}$. Сравните рассчитанное значение с величиной делений координатных осей. Укажите единицы измерения около осей координат на Вашем рисунке.

Задание 2. Поле диполя.

1. Измените знак одного из зарядов: $Q_2 = -2 \text{ нКл}$.

2. Зарисуйте полученные эквипотенциалы, указав около каждого из зарядов по 3 эквипотенциалы. Учтите, что красным цветом показана потенциал 10 кВ , последующие значения уменьшаются на 2 кВ . Белым цветом отмечена линия нулевого потенциала.

Задание 3. Поле двух неравных по величине зарядов.

1. Измените значения зарядов: $Q_1 = 3,5 \text{ нКл}$ и $Q_2 = -2 \text{ нКл}$.

2. Зарисуйте эквипотенциалы $\varphi = 10 \text{ кВ}$, 4 кВ , 0 кВ , -4 кВ , обратив внимание на симметрию кривых относительно координатной оси OX .

Задание 4. Влияние расстояния между зарядами на распределение линий эквипотенциалей.

1. Введите $Q_1 = -0,5 \text{ нКл}$; $Q_2 = 2,5 \text{ нКл}$; $X_2 = 0,8 \text{ см}$.

Эти значения будут фиксированными. Посмотрите, как меняется форма семейств эквипотенциалей, при изменении расстояния между

точечными зарядами. Для сближения зарядов последовательно увеличьте значения координаты X_i :

(а) 0,4 см, (б) 0,45 см, (в) 0,6 см, (г) 0,75 см.

2. Определите по графику, на каком расстоянии от положительного заряда в случае (г) расположена эквипотенциаль $\varphi = 2$ кВ, сравните это расстояние с полученным в Задании 1.

3. Какой вывод можно сделать из сопоставления случаев (а) и (г)?

Задание 5. Поле трех зарядов.

1. Введите следующие значения величин зарядов и их координат:

$$Q_1 = Q_2 = -1 \text{ нКл}; Q_3 = 2 \text{ нКл};$$

$$Z_1 = 0,3 \text{ см}; X_1 = 0,5 \text{ см}; X_2 = 0,8 \text{ см}.$$

Конфигурация зарядов будет аналогична расположению ионов в молекуле воды.

2. Занесите рисунок в отчет. Обратите внимание на то, как проходит линия нулевого потенциала. Укажите значения потенциала для нескольких эквипотенциалей по разные стороны от линии нулевого потенциала.

Задание 7. Самостоятельно рассмотрите случай неравных трех зарядов в угловом или (и) в линейном расположении.

В заключение работы ответьте на вопрос: Могут ли электрически нейтральные тела иметь электрическое поле? Если могут, то от чего зависит его напряженность и потенциал?

ГЛОССАРИЙ

1. **Градиент** это вектор, направленный из точки с минимальным значением параметра в точку с максимальным значением параметра. Градиент – это векторная характеристика скалярного поля.
2. **Ортогональность** — понятие, являющееся обобщением перпендикулярности для линейных пространств с введённым скалярным произведением. Если скалярное произведение двух элементов пространства равно нулю, то они называются **ортогональными** друг другу.
3. **Потенциал (электростатический)** — скалярная энергетическая характеристика электростатического поля, характеризующая потенциальную энергию, которой обладает единичный положительный пробный заряд, помещённый в данную точку поля. Единицей измерения потенциала в Международной системе

единиц (СИ) является вольт (русское обозначение: В; международное: V), $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$).

4. **Принцип суперпозиции** – один из самых общих законов во многих разделах физики. В самой простой формулировке принцип суперпозиции гласит: *Результат воздействия на частицу нескольких внешних сил есть векторная сумма воздействия этих сил.*
5. **Силовая линия** — это кривая, касательная к которой в любой точке совпадает по направлению с вектором, являющимся элементом векторного поля в этой же точке. Применяется для визуализации векторных полей, которые сложно наглядно изобразить каким-либо другим образом. Иногда (не всегда) на этих кривых ставятся стрелочки, показывающие направление вектора вдоль кривой. Для обозначения векторов физического поля, образующих силовые линии, обычно используется термин «напряжённость».
6. **Эквипотенциальная поверхность** — это поверхность, на которой скалярный потенциал данного потенциального поля принимает постоянное значение (поверхность уровня потенциала).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте и запишите определение потенциала электростатического поля. Определите физический смысл и размерность единицы потенциала.
2. Сформулируйте принцип суперпозиции для электростатического потенциала и запишите формулу для потенциала поля, создаваемого системой точечных зарядов.
3. Как записывается работа поля по перемещению заряда через потенциал?
4. Какова дифференциальная связь между вектором напряжённости электростатического поля и потенциалом?
5. Какова интегральная связь между разностью потенциалов и напряжённостью электростатического поля?
6. Каковы особенности взаимного расположения эквипотенциалей и силовых линий электростатического поля?
7. Как, зная зависимость напряженности от координат, найти разность потенциалов между двумя точками поля?

8. Сформулируйте определение эквипотенциальной поверхности (линии) и нарисуйте систему эквипотенциальных линий для положительного и отрицательного точечных зарядов. На каких расстояниях друг от друга должны находиться соседние эквипотенциали?
9. Нарисуйте эквипотенциальные поверхности поля точечного заряда, поля плоскости и плоского конденсатора.
10. Чем отличается система эквипотенциалей положительного и отрицательного зарядов?
11. Перечислите свойства силовых линий электростатического поля.
12. Укажите примеры, где видна необходимость изучения топографии электростатического поля.
13. Чему равна работа перемещения заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
14. Дайте определение силовой линии. Какое направление имеет силовая линия?
15. Какое поле называется однородным? Как связаны между собой напряженность поля и потенциал в случае однородного поля?
16. Как рассчитать напряженность однородного электрического поля?
17. Какое поле называется квазистационарным?
18. Почему силовые линии электрического поля и эквипотенциальные поверхности ортогональны?
19. Опишите форму электродов, создающих квазистационарное электрическое поле. Зависит ли форма силовых и эквипотенциальных линий на проводящей бумаге от формы электродов?

ЛИТЕРАТУРА

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: ВШ, 1989. – 608 с.
2. Мэрион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. - М.: ВШ, 1986. -623 с.
3. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики. - М. -: ВШ, 1982.
4. Суорц Кл.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Пер. с англ. в 2-х томах . Т.2. - М: Наука. 1987. - 384 с.

5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для вузов. - М. Высшая школа. 1989. – 608 с.
6. Крауфорд Ф. Волны. Учебное руководство: пер. с англ./ Под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга. - М.: Наука. 1984. (Берклевский курс физики). - 520 с.
7. Мигдал А.Б. Квантовая физика для больших и маленьких. М.: Наука, 1989.-144с.
8. Пономарев Л.И. Под знаком кванта. - М.: Наука,1989. – 368 с.
9. Готфрид К., Вайскопф В. Концепции физики элементарных частиц. - М.: Мир, 1988. - 218с.