

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**Методические указания
для выполнения лабораторной работы**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Методические указания для выполнения лабораторной работы


Томск

Издательский Дом Томского государственного университета

2018

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО методической комиссией
физического факультета

Протокол № 3 от «15» декабря 2017 г.

Председатель комиссии:  М.А. Баньщикова

В методических указаниях рассмотрено изучение электростатического поля: приведены основные характеристики, описана методика построения эквипотенциальных линий и определение напряженности поля.

Методические указания рассчитаны на студентов нефизических специальностей очной и заочной форм обучения.

СОСТАВИТЕЛИ: доцент Н.А. Александров,
зав. лаб. Н.И. Иванова

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: изучение основных характеристик электростатического поля; построение эквипотенциальных поверхностей.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД И ЕГО СВОЙСТВА

Все тела способны электризоваться, т. е. приобретать электрический заряд. В природе существуют заряды двух видов: положительные и отрицательные. Носителями зарядов являются элементарные частицы электрон и протон. Заряд почти всех элементарных частиц одинаков по абсолютной величине и представляет собой наименьший встречающийся в природе электрический заряд называемым элементарным зарядом. Экспериментально найдено, что элементарный заряд электрона равен $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл. Электрон заряжен отрицательно, протон – положительно. Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.

Обобщая опытные факты, английский физик Фарадей установил фундаментальный закон природы – **закон сохранения** заряда: алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остается неизменной при любых процессах, происходящих внутри этой системы.

Опытные данные свидетельствуют о том, что электрические заряды удовлетворяют свойству **аддитивности**. Это означает, что если к заряду q_1 добавить заряд q_2 , то результирующий заряд равен $q_1 + q_2$.

И, наконец, электрический заряд – величина **релятивистски инвариантная**, то есть не зависит от того, движется этот заряд или покоится.

ЗАКОН КУЛОНА

Заряд на физическом теле, размеры которого значительно меньше расстояний до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует, называется **точечным зарядом**.

В 1785 г. Кулон экспериментально установил закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов:

сила взаимодействия F между двумя точечными неподвижными зарядами в вакууме пропорциональна произведению величин зарядов q_1 и q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от системы единиц: в системе СИ коэффициент пропорциональности равен

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Фл} / \text{м}$ – электрическая постоянная.

В векторной форме закон кулона имеет вид

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (2)$$

Сила \vec{F} направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, т.е. является центральной (рис.1).

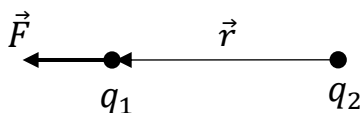


Рис.1

Если взаимодействующие заряды находятся в однородной изотропной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , то сила взаимодействия между ними равна

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^3} \quad (3)$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Для описания взаимодействия электрических зарядов введено понятие электрического поля – особой формы материи, которая выполняет функцию передатчика взаимодействия между зарядами. Основное свойство этого поля проявляется в том, что оно действует с некоторой силой на другой заряд, помещенный в это поле. При этом этот другой заряд играет лишь роль индикатора, свидетельствующего о наличии поля, поле же создается любым зарядом в окружающем его пространстве.

Понятие электрического поля представляет собой одно из первичных и фундаментальных понятий физики.

Если поле создается неподвижными электрическими зарядами, то оно называется электростатическим.

Для обнаружения и опытного исследования электростатического поля используется пробный точечный положительный заряд – такой заряд, который своим присутствием не искажает исследуемое поле.

Если в поле, создаваемое зарядом q , поместить пробный заряд q_0 , то на него действует сила \vec{F} , различная в разных точках поля, которая согласно (1), пропорциональна q_0 . Отношение же F/q_0 не зависит от величины пробного заряда и характеризует электростатическое поле в той точке, где находится пробный заряд. Эта величина является **силовой характеристикой поля и называется его напряженностью**.

Итак, напряженность \vec{E} электростатического поля в данной точке есть физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (4)$$

Направление вектора \vec{E} совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

Напряженность электростатического поля, созданного точечным зарядом q в вакууме на расстоянии r от него, как это следует из (4), равна

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (5)$$

или в векторной форме

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r}. \quad (6)$$

Графически электростатическое поле изображается с помощью линий напряженности (силовых линий), которые проводят так, чтобы касательная к ним в каждой точке пространства совпадала по направлению с вектором напряженности в данной точке поля (рис. 2).

Так как в данной точке пространства вектор напряженности имеет лишь одно направление, то силовые линии никогда не пересекаются. Для однородного поля вектор напряженности постояен по величине и направлению и силовые линии параллельны между собой. В неоднородном поле силовые линии не параллельны. Примером однородного поля может быть поле внутри плоского конденсатора, а неоднородного – поле точечного

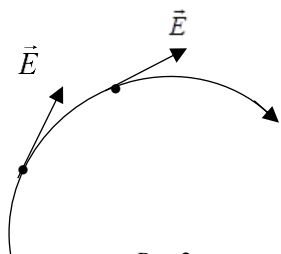


Рис.2

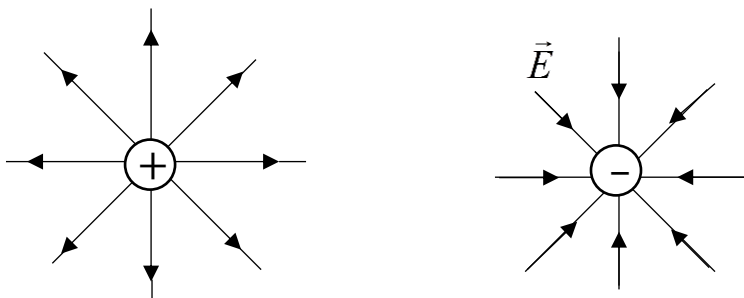


Рис.3

заряда (рис.3) и поле двух одно- и разноименно заряженных тел (рис.4,а-б)

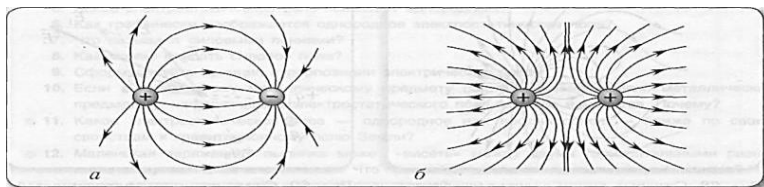


Рис. 4

Если поле создается точечным зарядом, то линии напряженности представляют собой радиальные прямые, выходящие из заряда, если он положителен, и входящие в него – если заряд отрицателен (рис. 3).

Величину напряженности электростатического поля принято

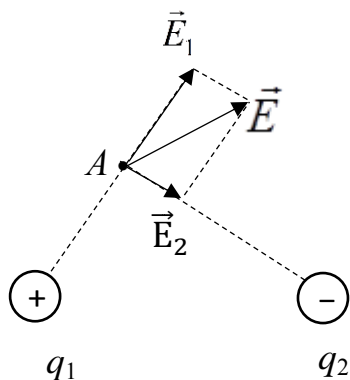


Рис.5

изображать степень густоты силовых линий. Число линий напряженности, проходящих через единицу площади поверхности, перпендикулярной силовым линиям, должно быть равно модулю вектора \vec{E} . Рассмотрим поле, созданное двумя точечными зарядами q_1 и q_2 (рис. 5). Пусть \vec{E}_1 – напряженность поля в точке A , создаваемая зарядом $q_1 > 0$ (когда заряда q_2 нет вовсе), а \vec{E}_2 – напряженность поля

заряда $q_2 < 0$ (когда нет заряда q_1). Опыт показывает, что **напряженность результирующего поля (при наличии зарядов q_1 и q_2) может быть найдена по правилу сложения векторов.** Правило векторного сложения напряженностей электрических полей справедливо не только для двух, но и для любого количества зарядов. Если $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_i$ – напряженность полей, создаваемых отдельными зарядами q_1, q_2, \dots, q_i в какой-либо точке, то напряженность результирующего поля \vec{E} в этой точке равна

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_i = \sum_i \vec{E}_i. \quad (7)$$

Итак, напряженность результирующего электрического поля есть векторная сумма напряженностей, создаваемых отдельными зарядами. Последнее утверждение составляет содержание одного из важнейших свойств электрических полей – **принципа суперпозиции.**

РАБОТА СИЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

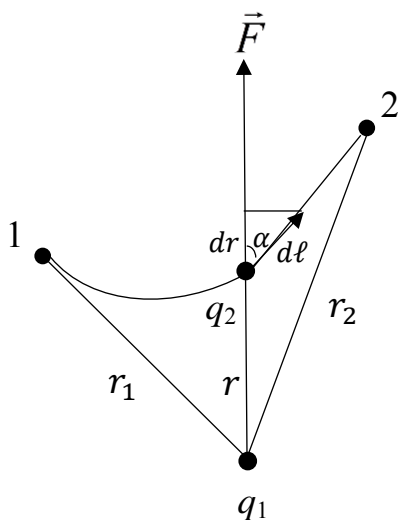


Рис.6

Рассмотрим электростатическое поле, создаваемое точечным зарядом q_1 . В поле этого заряда находится другой точечный заряд q_2 , на который со стороны поля заряда q_1 , действует сила $\vec{F} = q_2 \vec{E}$. Заряд q_2 перемещается вдоль произвольной траектории 1-2 (рис. 6). Естественно, что в связи с перемещением, положение заряда q_2 относительно заряда q_1 будет меняться, при этом будет меняться сила и энергия взаимодействия между зарядами. Энергия заряда в

электростатическом поле не зависит от времени и полностью определяется координатами заряда, и поэтому является потенциальной энергией.

Пусть заряд q_2 в точках 1 и 2 обладает потенциальной энергией W_1 и W_2 . Разность потенциальной энергии будет равна работе поля, совершаемой при перемещении заряда q_2 . На элементарном пути $d\ell$ работа электростатического поля dA равна бесконечно малому изменению потенциальной энергии dW , взятому со знаком «минус»

$$dA = F \cdot d\ell \cdot \cos\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} d\ell \cdot \cos\alpha \quad (8)$$

Из рис.6 следует, что $d\ell \cdot \cos\alpha = dr$, тогда

$$dA = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} dr \quad (9)$$

Работа по перемещению заряда q_2 из точки 1 в точку 2 будет равна

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} dA = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1 q_2}{r_1} - \frac{q_1 q_2}{r_2} \right) \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что работа электростатического поля по перемещению заряда не зависит от траектории движения, а определяется только начальным r_1 и конечным r_2 положениями заряда q_2 .

Поля, в которых выполняется это условие, называются **потенциальными**, а действующие в них силы – консервативными. Следовательно, работа, совершаемая полем при перемещении заряда по замкнутому пути, равна нулю.

ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Поскольку электростатическое поле является потенциальным, то заряд, находящийся в таком поле, обладает потенциальной энергией. Как следует из (10) потенциальные энергии заряда q_2 в точках 1 и 2 поля, созданного зарядом q_1 , будут иметь вид

$$W_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_1} \quad (11)$$

$$W_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_2}$$

Из (11) следует, что для **данной** точки поля потенциальная энергия заряда в электростатическом поле не зависит от величины этого заряда, поэтому отношение, например,

$$\frac{W_1}{q_2} = \text{const.}$$

Это отношение выбирается в качестве энергетической характеристики электростатического поля и называется его **потенциалом**. Следовательно, потенциал поля в точке 1 равен

$$\frac{W_1}{q_2} = \varphi_1$$

Если q_2 – единичный положительный заряд, то потенциал данной точки поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля.

Потенциал поля, созданного точечным зарядом q_1 на расстоянии r_1 и r_2 равен

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1}; \quad \varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_2} \quad (12)$$

Потенциал – величина скалярная, если поле создается несколькими зарядами, то потенциал поля системы зарядов равен алгебраической сумме потенциалов полей всех этих зарядов.

Принимая во внимание (12), выражение работы (10) по перемещению заряда из точки 1 в точку 2 запишем в виде

$$A_{12} = \left(\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2} \right) = W_1 - W_2 = q_2 (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (13)$$

Выражение $U = \varphi_1 - \varphi_2$ называется **напряжением** электростатического поля между точками 1 и 2.

СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ПОТЕНЦИАЛОМ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Одну и ту же точку электростатического поля можно характеризовать двумя величинами: силовой характеристикой – напряженностью и энергетической характеристикой – потенциалом. Найдем связь между ними.

Предположим, что единичный положительный заряд перемещается из одной точки поля в другую вдоль оси x при условии, что точки расположены бесконечно близко друг к другу, т.е. $dx = x_2 - x_1$. Тогда работа по перемещению заряда равна

$$dA = F_x dx = E_x q dx = E_x dx, \quad (14)$$

где F_x – проекция силы взаимодействия на направление перемещения.

Эта же работа может быть выражена через разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = -d\varphi$

$$dA = q(-d\varphi) = -d\varphi \quad (15)$$

Приравнявая выражения (14) и (15), получаем

$$-d\varphi = E_x dx, \text{ откуда}$$

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx} \quad (16)$$

Поскольку потенциал может меняться по любому из направлений пространства, аналогичные выводы можно сделать для осей y и z

$$E_y = -\frac{d\varphi}{dy}, \quad E_z = -\frac{d\varphi}{dz}. \quad (16')$$

Соотношения (16) и (16') можно объединить в одну векторную формулу

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \vec{k} \right), \quad (17)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные орты координатных осей x, y, z . Так как напряженность поля – вектор, то и выражение в скобках в (17) также есть вектор. Он называется градиентом скаляра φ и обозначается $grad\varphi$ или $\nabla\varphi$. Таким образом, по определению

$$grad\varphi \equiv \nabla\varphi = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \vec{k} \right) \quad (18)$$

Теперь формулу (17) можно записать так

$$\vec{E} = -grad\varphi = -\nabla\varphi \quad (19)$$

Знак «минус» в (19) указывает на то, что вектор напряженности направлен в сторону убывания потенциала.

Для визуального отображения электростатических полей кроме силовых линий применяются также эквипотенциальные поверхности.

Эквипотенциальной поверхностью называется геометрическое место точек электростатического поля, потенциалы которых одинаковы.

Количество эквипотенциальных поверхностей вокруг каждой системы зарядов может быть произвольным, но картина поля, построенная с помощью эквипотенциальных поверхностей, будет наглядней, если разность потенциалов между любыми соседними

эквипотенциальными поверхностями одна и та же. В этом случае по густоте эквипотенциальных поверхностей можно визуально судить о величине напряженности поля в данном месте.

Работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности согласно (13) равна нулю, но работа по перемещению заряда равна нулю и в том случае,

$$\vec{F} \perp d\vec{\ell}; \quad \vec{E} \perp d\vec{\ell}$$

Следовательно, вектор напряженности электростатического поля, а значит и силовые линии, нормальны к эквипотенциальным поверхностям. На рис. 7

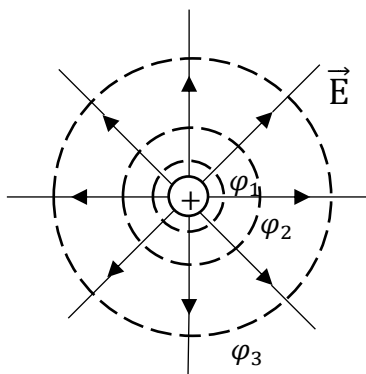


Рис.7

представлена картина эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля точечного заряда.

Экспериментальное и теоретическое изучение распределения потенциалов электростатического поля проще, чем определение напряженностей поля. Поэтому в данной работе экспериментально определяется распределение потенциалов электростатического поля, а силовые линии изучаемого поля можно построить потом, как кривые, ортогональные к экспериментально найденным эквипотенциальным поверхностям (на плоскости – эквипотенциальные линии).

Трудности электростатических измерений привели к разработке особого метода изучения электростатических полей – метода моделирования электростатических полей. Оказывается, что при некоторых условиях поле, создаваемое заряженными электродами, аналогично полю в проводящей среде, по которой течет ток между установленными в ней электродами. Тогда изучение электростатического поля между системой заряженных

проводников можно заменить изучением электрического поля постоянного тока между той же системой проводников.

В данной работе изучение электростатического поля неподвижных зарядов заменено изучением стационарного поля электрического тока, протекающего в слабо проводящей среде (электропроводящая бумага) между двумя электродами.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

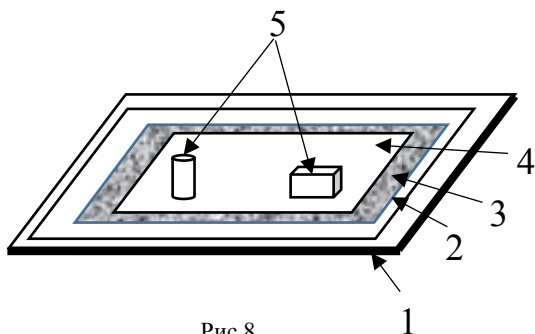


Рис.8

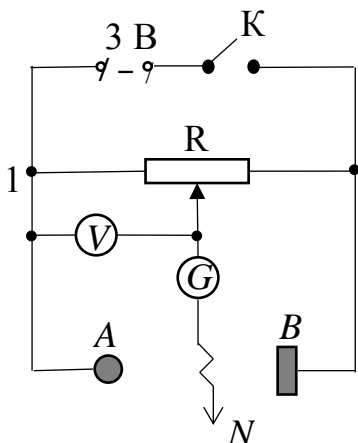


Рис.9

Для сборки экспериментальной установки на стекло 1 (рис.8) помещается лист писчей бумаги 2, затем кладется лист копировальной бумаги 3, поверх которой помещается лист электропроводной бумаги 4. На электропроводной бумаге размещают два электрода 5, к клеммам которых подключается электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 9. Она состоит из источника питания

(розетка постоянного тока укреплена на столе), ключа K , потенциометра R , вольтметра V и гальванометра G , к которому присоединен зонд N . При замыкании ключа K по электропроводящей бумаге течет слабый ток. Разность потенциалов между электродами A и B поддерживается неизменной за счет источника ЭДС. Разность потенциалов между точкой 1 и движком реостата можно плавно менять, что приведет к соответствующему изменению разности потенциалов между электродом A и зондом N . Следовательно, всегда можно найти на электропроводной бумаге точку с тем же потенциалом, что и движок реостата. Если острие зонда поместить в эту точку, то ток через гальванометр будет равен нулю.

Таким образом, приведенная схема позволяет находить на электропроводной бумаге точки с одинаковым потенциалом, равным потенциалу движка реостата. Этот потенциал измеряется вольтметром V . Найдя ряд таких точек, можно построить эквипотенциальные линии, соответствующие конфигурации поля стационарных токов, которые будут аналогичны линиям электростатического поля, создаваемого электродами A и B в вакууме.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Расположите писчую, копировальную и электропроводную бумагу на стекле, соблюдая последовательность, указанную на рис. 8.

2. Соберите схему, приведенную на рис. 9, зафиксировав перед началом работы положение электродов. Обведите карандашом электроды. Через копировальную бумагу на писчей бумаге будут отмечены их положения. Подключите схему к источнику питания.

3. Ползунок потенциометра поставьте в положение, соответствующее эквипотенциальной линии вблизи левого электрода (показания вольтметра 0,2–0,3 В).

4. Передвигая зонд по бумаге, найдите точку, имеющую этот потенциал, что соответствует нулевому показанию гальванометра. Легким нажатием на зонд отметьте положение этой точки. Таким способом следует найти положение 10–15 точек вдоль одной эквипотенциальной линии.

5. Меняя положение движка реостата и увеличивая показания вольтметра на 0,2–0,3 В, аналогичным образом можно найти следующую линию равного потенциала. Выполняя указанную последовательность действий при изменении показаний вольтметра на одну и ту же величину, фиксируйте положение точек, соответствующих эквипотенциальным линиям, которые все ближе располагаются к правому электроду.

6. По окончании эксперимента на листе писчей бумаги через точки, соответствующие одному и тому же потенциалу, проводим линии равного потенциала. В результате получается картина эквипотенциальных линий для выбранного расположения и формы электродов. Около каждой линии следует указать значение потенциала.

7. Используя свойство перпендикулярности силовых линий эквипотенциальным поверхностям, строим картину силовых линий поля.

Примечание 1. Работу необходимо выполнять для двух пар электродов.

Примечание 2. По указанию преподавателя найти конфигурацию поля для системы из трех электродов. Третий электрод *C* помещается между электродами *A* и *B*. Этот вариант моделирует одну из схем поиска полезных ископаемых. При этом электрод *C* указывает на залежи руды (проводимость руды много больше проводимости земли).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте и запишите закон Кулона.

2. Что является силовой характеристикой электростатического поля?
3. Что является энергетической характеристикой электростатического поля?
4. Связь напряженности электростатического поля и потенциала.
5. Дайте определение эквипотенциальной поверхности. Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной линии?
6. Опишите методику выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики-М, АСТ, 2004.
2. Демидченко В.И. Физика. Высшее образование.-Р-на-Д, 2008.
3. Сивухин В.Д. Общий курс физики. М.: физматгиз МФТИ, 2005. Т. 3

Издание подготовлено в авторской редакции

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 2990 от «01» февраля 2018 г. Тираж 50 экз.

