

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет  
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка  
по общему физическому практикуму**

**Лаб. работа № 1**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ**

**Работу поставил доцент Попов Ю. Ф.**

**Москва - 2011**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

**Цель работы:** построение эквипотенциальных поверхностей.

**1. Электрический заряд.** В настоящее время установлено, что носителями электрических свойств в веществах являются электроны и протоны, входящие в состав атомного ядра. Их заряды ( $\pm 1,6 \cdot 10^{-19}$  К) не приобретаются в результате электризации или каких-либо других процессов, а являются стабильным неотъемлемым свойством частицы, количественно постоянным в течение всей жизни частицы и ответственным за ее электрические (или, в более широком аспекте, электромагнитные) взаимодействия. Именно эти свойства и лежат в основе определения электрического заряда. В современной трактовке электрический заряд определяется как внутренняя характеристика элементарной частицы, определяющая ее электромагнитное взаимодействие. К числу фундаментальных законов, описывающих свойства и поведение электрических зарядов, относятся закон сохранения заряда и закон взаимодействия точечных электрических зарядов (закон Кулона):

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

где  $k$  — коэффициент, зависящий от выбора единиц измерений;  $q_1, q_2$  — заряды,  $R$  — расстояние между зарядами.

**2. Электрическое поле.** Вопрос: является ли уединенный заряд источником электрических сил в пространстве или никак не действует на пространство? Для ответа следует провести измерение электрических сил вокруг уединенного заряда, не пользуясь другими электрическими зарядами. Это означает сохранить уединенность электрического заряда, так как при наличии другого, пробного заряда возникает взаимодействие по закону Кулона. Но других способов измерения электрических сил неизвестно. С другой стороны, положение о заряде как источнике электрических сил в окружающем пространстве не противоречит фундаментальным принципам природы. И мы можем ввести модель, согласно которой вокруг уединенного заряда всегда существуют электрические силы, определяющие состояние пространства. Состояние пространства вокруг заряда, в котором существуют электрические силы, называется электрическим полем. Таким образом, в электростатике электрическое поле рассматривается как удобная модель, однако в учении о движущихся зарядах "поле" имеет глубокий физический смысл и является материальным носителем взаимодействия. Силы поля будут определены, если определена в каждой точке этого поля сила, действующая на помещенный в нее пробный заряд (единичный положительный заряд). Эта сила называется напряженностью электрического поля

$$E = \frac{F}{q}. \quad (2)$$

При перемещении электрического заряда  $q$  из точки  $R_1$  в точку  $R_2$  электрическим полем напряженностью  $E$  совершается работа

$$A_{12} = \int_{R_1}^{R_2} (\vec{F} d\vec{l}) = q \int_{R_1}^{R_2} E_e dl, \quad (3)$$

если  $q = 1$ , то 
$$A_{12} = \int_{R_1}^{R_2} E_e dl, \quad (4)$$

где  $\vec{F}$  — сила, действующая на заряд,  $d\vec{l}$  — перемещение,  $E_e$  — составляющая вектора  $E$  на направление  $dl$ . Элементарным расчетом можно показать, что работа электрических сил по перемещению единичного заряда на произвольном пути в поле неподвижного точечного заряда  $Q$ , равна

$$A_{12} = \int_{R_1}^{R_2} E_e dl = - \left( \frac{Q}{R_2} - \frac{Q}{R_1} \right) \quad (5)$$

и не зависит от формы пути. Для замкнутого пути

$$A = \oint E_e dl = 0. \quad (6)$$

Таким образом, всякое электростатическое поле есть поле потенциальное. Это дает возможность ввести понятие потенциал электрического поля. Разность потенциалов между двумя точками ( $R_2$  и  $R_1$ ) электростатического поля равна взятой с обратным знаком работе, совершаемой силами поля при перемещении единичного, положительного заряда из первой точки во вторую:

$$\varphi_1 - \varphi_0 = - \int_{R_0}^{R_1} (E dl). \quad (7)$$

Очевидно, что потенциалу  $\varphi_0$  произвольной точки поля  $R_0$  всегда можно приписать любое наперед выбранное значение. Дело в том, что путем измерения работы может быть определена только разность потенциалов, но не абсолютная его величина. Однако, как только фиксировано значение потенциала в какой-либо точке поля, значение его во всех остальных точках определено однозначно (6). Обычно аддитивную постоянную в выражении потенциала выбирают так, чтобы потенциал бесконечно удаленных точек ( $\varphi_\infty$ ) был равен нулю. При этом условии (7) принимает вид:

$$\varphi = \varphi_\infty - \int_{R_\infty}^{R_0} E_1 dl = \int_{R_0}^{\infty} E_1 dl \quad \text{т.к. } (\varphi_\infty = 0) \quad (8)$$

т.е. потенциал точки  $R_0$  равен работе, совершаемой силами поля при удалении единичного, положительного заряда из точки  $R_0$  в бесконечность.

**Связь величин  $E$  и  $\phi$ :** напряженность электрического поля  $E$  равна градиенту электростатического потенциала  $\phi$ , взятому с обратным знаком:

$$\vec{E} = - \text{grad } \phi. \quad (9)$$

**3. Графическое представление электрического поля.** Одним из способов представления является построение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей электрического поля. Силовой линией электрического поля называется линия, касательные к которой в каждой ее точке совпадают по направлению с вектором напряженности поля  $E$  в той же точке. Очевидно, что через каждую точку поля, в которой  $E \neq 0$ , можно провести только одну силовую линию. На рис. 1 показаны силовые линии и эквипотенциальные поверхности системы двух равных одноименных (А) и разноименных (В) точечных электрических зарядов, расположенных на расстоянии  $G$  друг от друга. При построении считается, что силовые линии начинаются на положительном и заканчиваются на отрицательном заряде, или при наличии одного заряда одним концом уходят в бесконечность. Силовые линии не могут быть замкнутыми, так как в случае замкнутой линии поле не будет потенциальным. С другой стороны, силовые линии не могут уходить двумя концами в бесконечность, так как в этом случае  $\int E_e dl \rightarrow \infty$ .

Нанести на чертеж все силовые линии невозможно, поэтому они чертятся так, чтобы в любом участке поля число линий пересекающих перпендикулярную к ним площадку единичной площади, было пропорционально численной величине напряженности поля на этой площадке. В каждом случае густота расположения силовых линий служит мерой напряженности поля. Так как число силовых линий определяется напряженностью  $E$ , а напряженность поля пропорциональна заряду, общее число силовых линий, идущих от заряда, должно быть пропорционально его

величине.

Если на линиях напряженности отметить точки одинакового потенциала и соединить их между собой, то полученные при этом поверхности (в плоскости

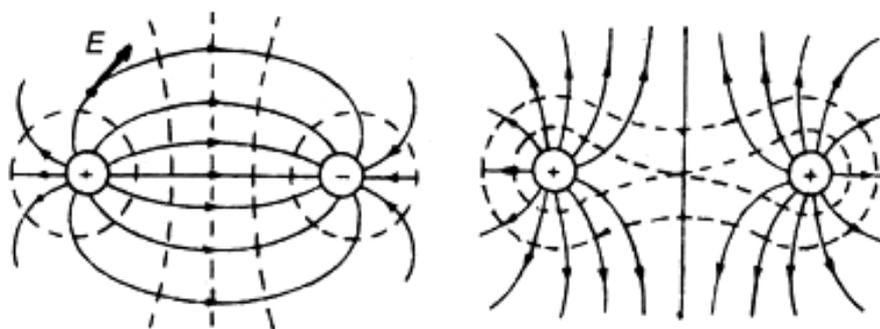


Рис. 1. Уравнение силовых линий:  
 $(z + a)[(z + a)^2 + r^2]^{-1/2} = - (z - a)[(z - a)^2 + r^2]^{-1/2} = C.$

рисунка это будут кривые) называются эквипотенциальными.

**4. Проводники в электрическом поле.** Когда мы говорим об электрических зарядах, то имеем в виду заряженные тела. При этом под точечными зарядами мы понимаем заряженные тела, размерами которых в условиях данной задачи можно пренебречь. Все тела по электрическим свойствам разделяются на тела, вещество которых содержит заряды, свободно движущиеся внутри по всему объему тела (проводники) и тела, заряды которых при своем движении остаются в пределах атома или молекул, в состав которых они входят (изоляторы).

При помещении проводника в электростатическое поле или при сообщении ему заряда в проводнике происходит перераспределение заряда, приводящее к новому равновесию зарядов. Равновесие зарядов означает, что внутри проводника на них не действуют силы, т.е.  $\vec{E}$  внутри проводника равно нулю и направление  $\vec{E}$  на поверхности проводника перпендикулярно поверхности (в противном случае возникнет составляющая  $\vec{E}$  вдоль поверхности проводника, которая вызовет движение зарядов). Так как напряженность поля внутри проводника равна нулю, а на поверхности перпендикулярна ей, то разность потенциалов между любыми двумя точками проводника, лежащими на поверхности и внутри него, равна нулю. Таким образом, потенциал всех точек проводника один и тот же, и поверхность проводника является эквипотенциальной.

**Установка:** электролитическая ванна<sup>1</sup>, масштабная сетка с электродами, вольтметр, лист миллиметровой бумаги.<sup>2</sup>

## Порядок выполнения работы.

### Упражнение 1

#### Построение эквипотенциальных поверхностей поля двух разноименных точечных зарядов.

1. Положить масштабную сетку с электродами на дно электролитической ванны и налить воду, так чтобы электроды оказались на 3-4 мм ниже уровня воды. Проводники, подводящие напряжение к электродам, должны располагаться внизу под сеткой.

---

<sup>1</sup> Электролитическая ванна является удобной моделью для изучения электростатического поля. Это обусловлено тем, что при некоторых условиях распределение потенциалов в среде, по которой течет ток между установленными в ней электродами, может быть сделано тождественным с распределением потенциалов между теми же электродами, когда они находятся в вакууме.

<sup>2</sup> Расположение и функциональное назначение основных органов управления приборов, а также краткие рекомендации по эксплуатации приборов, используемых в этой и в следующих работах, см. с. 38, 39.

2. Соединить приборы и электроды согласно схеме, приведенной на рис. 2. При этом черные провода, идущие от генератора и вольтметра, необходимо подключить к одному электроду<sup>3</sup>, потенциал которого будет равен нулю, так как приборы заземлены.

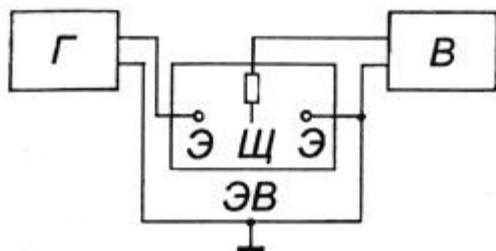


Рис. 2. Схема соединения приборов. Г — генератор, В — вольтметр, ЭВ — электролитическая ванна, Э — электроды, Щ — щуп

3. Установить на генераторе частоту 60 Гц (переключатель "множитель" в положении х 1, декадные переключатели или шкала плавного изменения частоты в положении 60,0 Гц).

Регулятор величины выходного напряжения поставить в среднее

положение (на выходе генератора установится напряжение 5-6 В).

4. Универсальный прибор—вольтамперметр - включить в режиме вольтметра (кнопка рода работ —  $U$ ) для измерения переменного напряжения (кнопка  $\approx$  в утопленном положении). Включить предел измерения 20В (кнопка "20"). Щуп с черным проводом включить в гнездо \*, щуп с красным проводом — в гнездо "U".

5. Измерить разность потенциалов между электродами, для чего щупом на красном проводе коснуться электрода<sup>4</sup>, соединенного с белым проводником генератора. При необходимости регулятором выходного напряжения генератора установить разность потенциалов, равную 5-6 В. Отметить на миллиметровой бумаге расположение электродов (масштаб 1:1).

6. На прямой, соединяющей электроды, отметить точки, отстоящие друг от друга на расстояние 1-2 см. Помещая щуп (с красным проводом) в точки электролитической ванны, соответствующие отображенным на графике, произвести измерение потенциала в этих точках. Щуп надо располагать перпендикулярно к поверхности воды, а перед считыванием показаний вольтметра выждать 5-6 секунд, чтобы установились показания на световом табло прибора. Измеренные значения потенциала фиксируются на миллиметровой сетке рядом с точками, в которых они измерены.

7. Для каждого значения найденного потенциала найти еще 8-10 точек с таким же потенциалом (по 4-5 с каждой стороны от центральной прямой, являющейся осью симметрии). Для этого щуп медленно перемещают в пространстве между электродами до тех пор, пока показание вольтметра не будет соответствовать значению потенциала, полученному в точке на прямой линии. Найденные точки отмечаются на масштабной сетке и все точки с одинаковым значением потенциала соединяются плавной кривой.

<sup>3</sup> Данный электрод в настоящей задаче выполняет функции отрицательного заряда.

<sup>4</sup> Данный электрод выполняет функции положительного заряда.

## Упражнение 2

### Построение эквипотенциальных поверхностей поля при наличии проводящего тела.

1. Для изучения влияния проводящих тел на электростатическое поле, в пространстве между электродами в произвольном месте ванны помещается металлическое кольцо. В этом случае на графике отмечается положение электродов, и кольца. В остальном построение эквипотенциальных поверхностей осуществляется также как и в отсутствие проводящего тела.
2. После окончания измерений выключить приборы и вылить воду из ванны.

### КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О РАСПОЛОЖЕНИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОМ НАЗНАЧЕНИИ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ

#### I. Универсальный прибор — вольтамперомметр (рис. 1)

1. Гнездо для подключения щупа (красного) при измерении  $U$  и  $R$ .

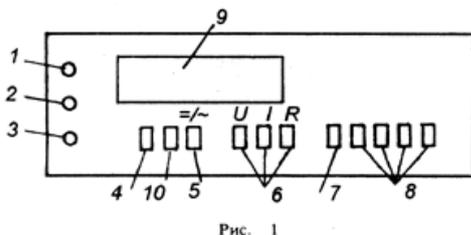


Рис. 1

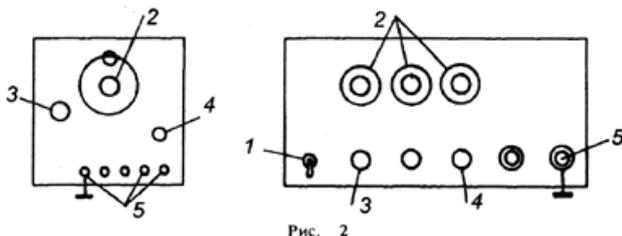


Рис. 2

2. Гнездо для подключения щупа (красного) при измерении  $I$ .

3. Гнездо для подключения черного щупа (заземление).

4. Включение прибора.

5. Измерение постоянных величин  $U$ ,  $I$ ,  $R$  — кнопка отжата (=), измерение переменных величин  $U$ ,  $I$  — кнопка нажата.

6. Переключение рода работы: вольтметр —  $U$ , амперметр —  $I$ , омметр —  $R$ .

7. Предел измерений  $200\text{ мВ}$ ,  $\text{мкА}$ ,  $\text{Ом}$  в зависимости от рода работы.

Диапазон измерений  $2$ ,  $20$ ,  $200$ ,  $2000$ ,  $\text{В}$ ;  $\text{мА}$ ;  $\text{кОм}$  в зависимости от рода работы.

8. Световое табло.

9. Подсветка светового табло.

#### II. Генератор переменного напряжения (рис. 2 а, б)

1. Включение прибора (для ГЗ-III включение вилки в сетевую розетку).

2. Декадные переключатели частоты (ГЗ-118), плавная установка частоты (ГЗ-III).

3. Переключатель "Множитель"; значение частоты, установленное ручками 2, надо умножить на коэффициент, на который указывает штрих на ручке.
  4. Регулятор выходного напряжения
- Гнезда, с которых снимается выходное напряжение переменной частоты.

### III. Осциллограф (рис. 3)

1. Включение осциллографа.
2. Управление яркостью свечения лучей.
3. Фокусировка лучей.

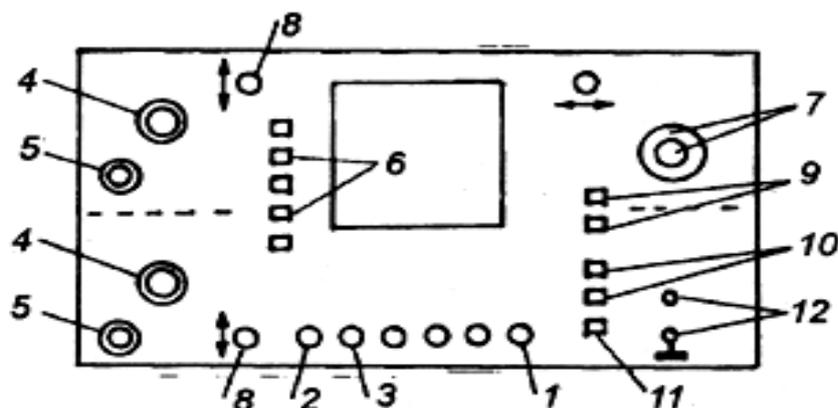


Рис. 3

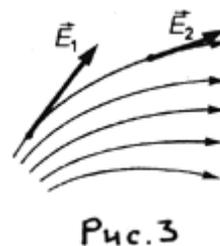
4. Ступенчатое переключение чувствительности каналов осциллографа (В/см, мВ/см). Плавная регулировка усиления не используется (ручки в крайнем положении по часовой стрелке).

5. Входные гнезда каналов осциллографа.
6. Кнопки включения одновременной работы обоих каналов.
7. Ступенчатое переключение частоты горизонтальной развертки. В центре — ручка плавной подстройки частоты развертки, — используется для стабилизации изображения на экране.
8. Ручки вертикального смещения лучей.
9. Кнопки включения внутренней синхронизации развертки от 1 и 2 каналов.
10. Кнопки включения внешней синхронизации развертки.
11. Кнопка переключения осциллографа для работы в X-Y-режиме, когда требуется наблюдение одного сигнала как функции, зависящей от другого.
12. Вход внешнего сигнала, обеспечивающего горизонтальную развертку в X-Y-режиме.

### Вопросы.

1. Дайте определение электрическому заряду.
2. Как определяется электрическое поле и каковы его свойства?
3. Материально ли электростатическое поле или это удобный способ описания электрических явлений?
4. Что такое линии напряженности поля и как они направлены?

5. Как показать, что некоторая линия напряженности, соединяющая положительный и отрицательный заряды, должна быть кривой?
6. Какое поле называется потенциальным? Как определяется потенциал электрического поля?
7. Что такое эквипотенциальная поверхность?
8. Доказать, что линии напряженности поля всегда перпендикулярны соответствующим эквипотенциальным поверхностям.
9. Доказать, что напряженность электрического поля в некоторой точке равна с обратным знаком градиенту потенциала этого поля в данной точке.
10. Как экранировать некоторое пространство от поля зарядов, расположенных вне этого пространства?
11. На рисунке приведена картина линий поля  $\vec{E}$ . Изобразить эквипотенциальные кривые и указать направление вдоль линий поля, в котором потенциал возрастает.



## ЛИТЕРАТУРА.

1. Белов Д.В. «Электродинамика и волновая оптика». Учебное пособие. Изд. Московского университета, 1994 г.  
Часть I. Электродинамика.  
Глава I. Электростатическое поле в вакууме.
  - § 1. Понятие об электростатическом поле и электрическом заряде.
  - § 2. Напряженность.
  - § 3. Потенциал.
2. Савельев И.В. «Курс общей физики»: Учебное пособие. Кн. 2 «Электричество и магнетизм», Издание 4-е. Москва. Наука. Физматлит. 1998.  
Глава 1. Электрическое поле в вакууме.
  - 1.1. Электрический заряд.
  - 1.2. Закон Кулона.
  - 1.3. Система единиц.
  - 1.4. Рационализированная запись формул.
  - 1.5. Электрическое поле. Напряженность поля.
  - 1.6. Потенциал.
  - 1.8.Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом.
  - 1.9. Диполь.
 Глава 3. Проводники в электрическом поле.

3.1. Равновесие зарядов на проводнике.

3.2. Проводник во внешнем электрическом поле.