

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

---

А.А. Куколева, С.М. Новиков

**ФИЗИКА**  
**ПОСОБИЕ**  
по выполнению лабораторной работы ЭМ-1  
**«ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ**  
**ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ»**

*для студентов I и II курса*  
*всех специальностей*  
*всех форм обучения*

Москва 2009

ББК 53  
К89

Рецензент: канд. физ.-мат. наук., Курочкин В.А.

Куколева А.А., Новиков С.М.

К89 Физика: Пособие по выполнению лабораторной работы ЭМ-1. Изучение электростатического поля заряженных тел. - М.: МГТУ ГА, 2008.- 11 с.

Данное пособие издается в соответствии с учебным планом для студентов 1 и 2 курса всех специальностей дневного обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 11.09.08 г. и методического совета 18.09.08 г.

Редактор Г.В. Токарева

---

Подписано в печать 20.11.08 г.

Печать офсетная  
0,69 усл.печ.л.

Формат 60x84/16  
Заказ № 686/045

0,42 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз.

---

*Московский государственный технический университет ГА*  
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20  
*Редакционно-издательский отдел*  
125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2008

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭМ-1 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ

## 1. Цель работы

Познакомиться с одним из вариантов моделирования физических процессов в лабораторных условиях; используя метод моделирования, построить систему силовых и эквипотенциальных линий электростатического поля между двумя заряженными проводниками. Анализируя характер полученного графического изображения поля, дать его качественное описание и рассмотреть основные свойства; научиться рассчитывать напряженность электростатического поля, используя взаимосвязь между векторным полем напряженности и скалярным полем потенциала. Приобрести умение прогнозировать характер линий поля от систем заряженных тел в простейших случаях.

## 2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по лекциям или учебнику [1–3]: основные свойства электрического поля в вакууме, проводники в электрическом поле. Прочитайте также разделы 3 и 4 методического описания, ознакомьтесь с конструкцией лабораторного стенда, порядком проведения измерений и обработки их результатов. Подготовьте проект отчета по лабораторной работе, включающий рабочие формулы, схемы и подготовленные к заполнению таблицы. Потренируйтесь отвечать на вопросы из раздела 7 данного описания и обучающего теста (на сайте кафедры физики или CD).

## 3. Краткая теория

Электростатическое поле порождается неподвижными электрическими зарядами и осуществляет взаимодействие между ними. Электрический заряд является неотъемлемой характеристикой некоторых элементарных частиц. Основными свойствами электрических зарядов являются:

- существование **двух видов** электрических зарядов, условно называемых положительными и отрицательными,
- для суммарного электрического заряда изолированной системы выполняется **закон сохранения**,
- существует **минимальная порция** электрического заряда, называемая элементарным зарядом,
- величина заряда **инвариантна** по отношению к смене инерциальной системы отсчета.

Наличие электрического поля проявляется в том, что на точечный электрический заряд  $q$  действует сила  $\vec{F}$ , не зависящая от скорости заряда. Характеристикой электрического поля является векторная величина

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (1)$$

называемая **напряженностью**. Напряженность электрического поля численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля. Согласно **закону Кулона** сила взаимодействия между точечными зарядами  $q_2$  и  $q_1$  (рис. 1) в вакууме равна

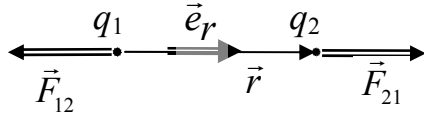
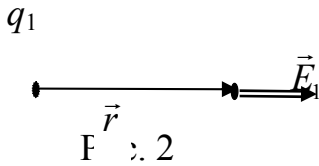


Рис. 1

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

где  $q_1$  и  $q_2$  – величины взаимодействующих точечных зарядов,  $r$  – расстояние между зарядами,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная в СИ,  $\vec{e}_r = \frac{\vec{r}}{r}$  – единичный вектор, направленный от заряда 1 к заряду 2.



Это взаимодействие осуществляется посредством электрического поля. На заряд  $q_2$  действует электрическое поле заряда  $q_1$  (рис. 2) с напряженностью

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{e}_r, \quad (3)$$

соответственно на заряд  $q_1$  действует электрическое поле заряда  $q_2$ .

Для вектора напряженности справедлив **принцип суперпозиции**, согласно которому результирующая напряженность электрического поля системы зарядов в некоторой точке равна векторной сумме напряженностей всех зарядов системы:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_N = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i. \quad (4)$$

где  $\vec{E}_i$  – напряженность поля, создаваемая в данной точке зарядом с номером  $i$ .

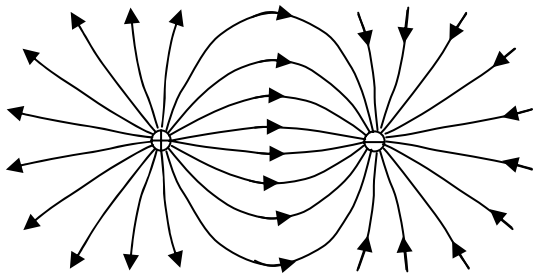
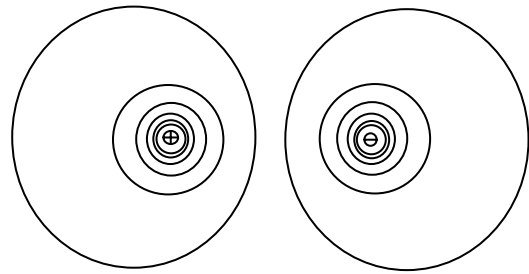
а)  $+q$  и  $-q$ ,б)  $+q$  и  $-q$ .

Рис. 3

Электрическое поле можно наглядно представить с помощью линий напряженности. На рис. 3а приведена картина линий напряженности в простейшем случае двух зарядов  $+q$  и  $-q$ . Линии напряженности непрерывны, могут начинаться или заканчиваться только на зарядах или в бесконечности. Касательные к ним совпадают с направлением напряженности поля в точке касания. Густота линий пропорциональна величине напряженности.

При расчете электрического поля, создаваемого протяженным телом с зарядом  $Q$ , необходимо записать формулу (4) в интегральной форме:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_Q \frac{dq}{r^2} \vec{e}_r. \quad (5)$$

Электростатическое поле *потенциально*. **Потенциал поля** численно равен работе, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки в точку, потенциал в которой равен нулю. Если принять, что на бесконечном расстоянии от точечного заряда  $q$  потенциал его поля равен нулю, то на расстоянии  $r$  от заряда величина потенциала поля находится по формуле:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}. \quad (6)$$

Принцип суперпозиции для электрического поля позволяет суммировать и потенциалы  $\varphi_i$ , создаваемые точечными зарядами в некоторой точке,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_N = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (7)$$

или интегрировать потенциалы элементарных зарядов  $dq$ :

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_Q \frac{dq}{r}. \quad (8)$$

Воображаемая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется эквипотенциальной поверхностью. Пересечение эквипотенциальных поверхностей с плоскостью рисунка 3б дает эквипотенциальные линии системы двух зарядов  $+q$  и  $-q$ . Между напряженностью и потенциалом электрического поля имеется взаимосвязь:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad \varphi_A - \varphi_B = \int_A^B \vec{E}(\vec{r}) d\vec{r}. \quad (9)$$

Расчет электрического поля заряженных тел произвольной формы по формулам (5) и (8) обычно является сложной задачей. При этом приходится учитывать как форму тела, так и распределение заряда по нему. В проводниках носители заряда (в металлах это электроны) могут перемещаться под действием сколь угодно малой силы. Для их равновесия необходимо выполнение следующих условий:

- напряженность поля внутри проводника должна быть равна нулю  $\vec{E}_{\text{вн}} = 0$ ,
- потенциал поля во всех точках проводника должен быть постоянным  $\varphi = \text{const}$ ,
- поверхность проводника является эквипотенциальной и напряженность поля в каждой точке поверхности проводника направлена по нормали к ней  $\vec{E} = \vec{E}_n$ ,
- напряженность поля вблизи поверхности проводника связана с поверхностной плотностью свободных зарядов  $\sigma$  формулой:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник (для воды  $\varepsilon = 81$ ).

#### 4. Методика проведения эксперимента и описание установки

В данной лабораторной работе требуется описать электростатическое поле между двумя заряженными проводниками, т.е. определить зависимость  $\vec{E}(\vec{r})$  и  $\varphi(\vec{r})$ . Из-за сложности конфигурации используемых проводников аналитическое решение данной задачи затруднено. Поэтому будем использовать графический метод описания поля в виде семейств эквипотенциальных и силовых линий. Для их построения необходимо экспериментально определить либо значения потенциалов в различных точках исследуемой области, либо значения напряженности. Технически проще, измеряя потенциалы, построить эквипотенциальные линии (пересечения эквипотенциальных поверхностей с плоскостью рисунка), а затем по известной картине эквипотенциальных линий построить линии проекций напряженности поля на эту плоскость.

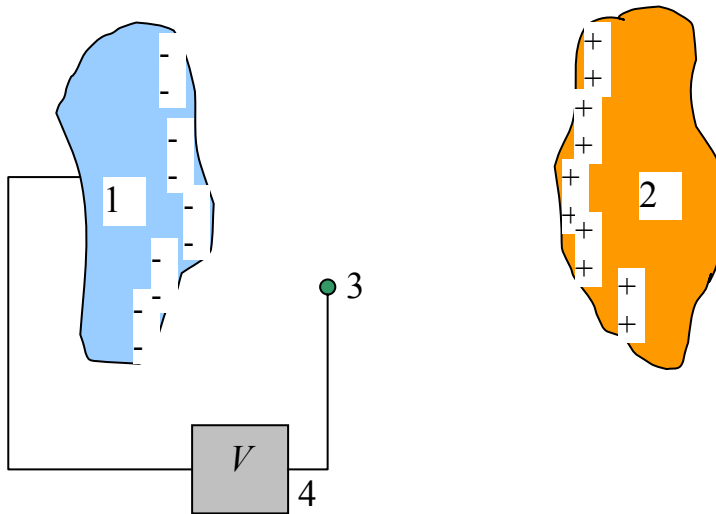


Рис. 4.

На рис. 4 приведена принципиальная схема измерения потенциала электростатического поля между заряженными телами 1 и 2 с помощью зонда 3. Зондом в данном случае является электрод, который помещается в исследуемую точку пространства.

По показаниям вольтметра 4 определяется разность потенциалов между зондом и одним из заряженных тел, потенциал которого принимается за нулевой. Естественно, что зонд должен как можно меньше нарушать своим присутствием исследуемое поле и принимать потенциал той точки, в которую он помещен. Но в непроводя-

щей среде, например, в воздухе, не может происходить автоматическое выравнивание потенциала точки поля и введенного в нее зонда. Для обеспечения выравнивания необходимо стекание зарядов с зонда.

Чтобы избежать этих трудностей, в лабораторной работе применен широко известный в науке и технике метод моделирования. Вместо изучаемого объекта – электрического поля в диэлектрической среде – исследуется поле стационарных токов в слабопроводящей жидкости. Для этого в лабораторной установке заряженные тела 1 и 2 (электроды) опускаются в кювету 7 с обычной водой, которая является слабым электролитом (рис. 5). В исследуемой области возникает поток зарядов от одного электрода к другому, т.е. электрический ток. Чтобы этот ток был стационарным, необходимо поддерживать исходные величины зарядов на электродах, что обеспечивается неизменной разностью потенциалов между ними. Для выполнения этого условия достаточно соединить тела с источником постоянного напряжения  $U$ .

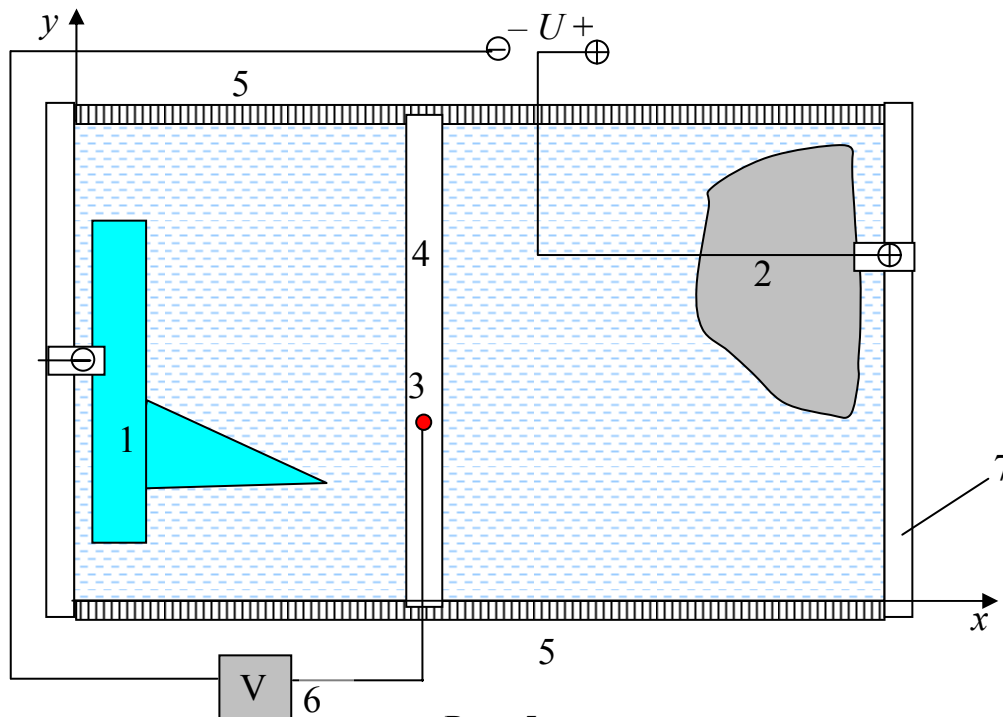


Рис. 5

Замечание: эквивалентность замены электростатического поля между электродами на поле постоянного тока в слабопроводящей среде можно обосновать математически. Оказывается, в обоих случаях потенциальные функции являются решением одного и того же дифференциального уравнения. Одинаковость дифференциального уравнения и граничных условий (формы электродов и их потенциалов) означает, что поля потенциалов в обоих случаях тождественны. Соответственно тождественными являются и поля напряженностей.

Для слабых токов в электролитах направление линий тока совпадает с направлением линий напряженности, что дает возможность сопоставить линиям напряженности электростатического поля линии тока. С технической же точки зрения переход к модели оправдан тем, что в этом случае измерение разности потенциалов осуществить значительно проще.

Такое моделирование не только избавляет от технических трудностей в лаборатории, но и позволяет исследовать сложные ситуации. В частности, с его помощью можно моделировать процессы электрического взаимодействия самолета с атмосферным электричеством.

В лабораторной установке (рис. 5) зондом служит металлический проводник 3 с острием, опущенным в воду. Вольтметр V подключен к одному из электродов и к зонду. Помещая острие зонда в заданную точку поля, по показаниям вольтметра определяют потенциал этой точки, а по координатным линейкам 4 и 5 — ее координаты  $(x, y)$ . Обработывая полученную таким образом базу данных  $\varphi_i = \varphi(x_i, y_i)$ , можно построить эквипотенциальные линии и линии напряженности поля. Для этого точки с одинаковым значением потенциала наносятся на миллиметровую бумагу, и по ним проводятся плавные эквипотенциальные линии. По известной картине эквипотенциальных линий можно построить линии напряженности. При этом используется взаимосвязь напряженности поля  $\vec{E}$  и потенциала  $\varphi$ , выражаемая формулами (9). Следствием этих уравнений является перпендикулярность линий напряженности к эквипотенциальным поверхностям в каждой точке. Для расчета численных значений напряженности можно воспользоваться тем, что

$$(\text{grad } \varphi)_l = \frac{d\varphi}{dl} \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}, \quad (11)$$

где  $l$  — расстояние вдоль выбранной линии напряженности.

## 5. Порядок выполнения работы

**Внимание!** Включение установки производится лаборантом. Питание осуществляется от источника *постоянного* напряжения. Величину напряжения между электродами устанавливает лаборант в соответствии с пределом шкалы измерительного прибора ( $U = 20 - 30$  В). Потенциал одного из электродов принимается за 0, потенциал второго  $\varphi_{\text{max}}$  равен величине установленного напряжения. Для стабилизации электрической цепи измерения рекомендуется начинать через 3 – 5 минут после включения питания. Для построения семейства эквипотенциальных линий удобно действовать следующим образом:

5.1. Зафиксируйте положение зонда 3 в передвижной координатной линейке 4, вставив зонд в одно из ее крайних отверстий. Запишите значение  $y_1$  в таблицу 1.

5.2. Перемещая линейку 4 по направляющим пазам координатных линеек 5, найдите координату нулевой эквипотенциали  $x_0$ . При этом зонд, перемещаясь вдоль одной из пунктирных линий на рис. 6, коснется одного из электродов и показание вольтметра будет  $\varphi = 0$ . Соответствующее значение  $x_0$  запишите в таблицу 1 (\*).

5.3. Сдвигая линейку 4 так, чтобы зонд перемещался вдоль той же пунктирной линии (оставив зонд в том же отверстии), определите по линейке 5 координату  $x_1$  следующей эквипотенциали с  $\varphi_1 = \varphi_0 + \Delta\varphi$ . Величина  $\Delta\varphi$  выбирается такой, чтобы



в диапазоне от 0 до  $\varphi_{\max}$  можно было определить положение примерно 10 эквипотенциалей, т.е.  $\Delta\varphi = 2 \div 3 \text{ В}$  (\*).

5.4. Оставив зонд в том же отверстии, произведите измерения координат остальных эквипотенциалей с  $\varphi_n = \varphi_0 + n\Delta\varphi$  при фиксированном значении  $y_1$  и заполните первый столбец в таблице 1. Последнее измерение производится при касании зондом второго электрода.

5.5. Аналогичные измерения проведите при других значениях координаты  $y_i$  с шагом, соответствующим расстоянию между соседними отверстиями на передвижной линейке 4, охватывая всю рабочую зону кюветы. Заполните таблицу 1.

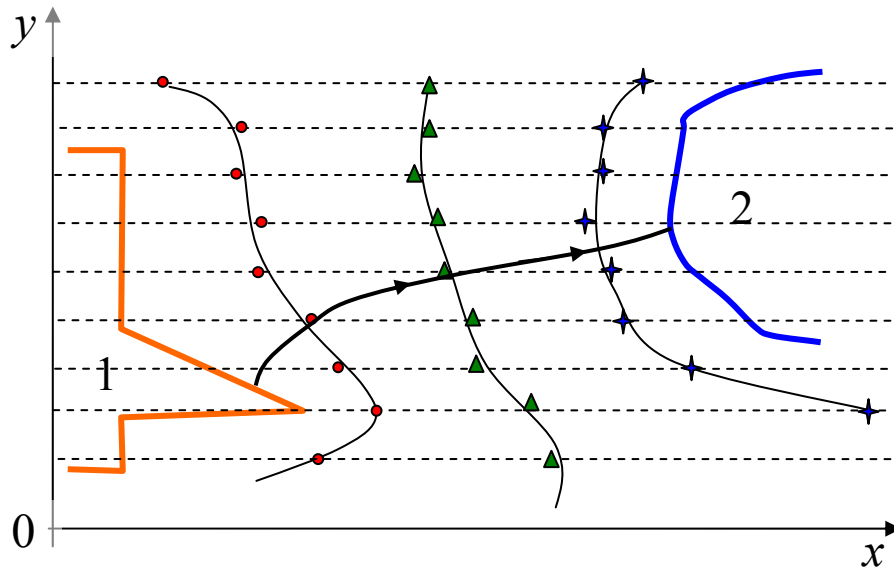


Рис. 6

Таблица 1

Координаты эквипотенциалей	Положение зонда относительно координатной линейки 4					
	$y_1 = \text{см}$	$y_2 = \text{см}$	$y_3 = \text{см}$	...	...	$y_n = \text{см}$
$x_0(\varphi_0 = 0 \text{ В})$						
$x_1(\varphi_1 = \text{В})$						
$x_2(\varphi_2 = \text{В})$						
$x_4(\varphi_3 = \text{В})$						
...						
...						
$x_m(\varphi_{\max})^{**}$						

\* – Для отдельных значений  $y$  такие точки отсутствуют. В этом случае необходимо перейти к следующему пункту.

\*\* –  $\varphi_{\max}$  соответствует разности потенциалов между электродами.

## 6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта

6.1. По данным таблицы 1 нанесите на миллиметровую бумагу точки, соответствующие одной из эквипотенциалей (из одной строки таблицы). Соединив их **плавной** линией, постройте эквипотенциальную линию. Аналогично постройте остальные эквипотенциальные линии. На рис. 6 приведены примеры построения трех таких линий. Для построения линий напряженности рекомендуется выбрать эквипотенциальную линию со средним значением потенциала ( $\approx 12$  В) и разбить ее на 5–7 участков примерно равной длины. Из середин каждого такого участка проведите к обоим электродам линии напряженности, руководствуясь свойством ортогональности линий напряженности и эквипотенциальных линий. На рис. 6 показана одна из таких линий.

6.2. Анализируя полученную картину линий поля, определите участок вблизи электрода 1 с наибольшей плотностью выходящих из него линий напряженности. Выберите одну из этих линий напряженности для дальнейших расчетов.

6.3. Измерьте расстояние  $\Delta l_{n,n-1}$  между соседними наиболее близкими эквипотенциальными линиями (с  $\varphi_n$  и  $\varphi_{n-1}$ ) вдоль выбранной линии напряженности (считая этот участок прямой линией).

6.4. Рассчитайте среднее значение напряженности поля для этого участка по формуле:

$$E_{\text{ср.}n,n-1} = \frac{\Delta\varphi_{n,n-1}}{\Delta l_{n,n-1}}.$$

Полученный результат запишите в отчет.

6.5. Рассчитайте плотность поверхностных зарядов на электроде 1 в точке выхода выбранной линии напряженности по формуле (10). Результаты расчетов запишите в отчет.

6.6. По полученным результатам сделайте выводы, в которых:

- а) объясните, как густота линий вблизи электродов связана с их формой;
- б) определите области на электродах, в которых наиболее вероятно возникновение электрического разряда при большой разности потенциалов между электродами;
- в) укажите, на каких участках поверхности электродов плотность зарядов увеличена.

## **7. Вопросы для допуска к лабораторной работе**

- 7.1. Опишите свойства электрического заряда.
- 7.2. Дайте определение вектора напряженности электрического поля.
- 7.3. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
- 7.4. Дайте определение потенциала поля в данной точке.
- 7.5. Какова взаимосвязь между напряженностью и потенциалом поля?
- 7.6. Сформулируйте условия равновесия зарядов в проводнике.
- 7.7. Перечислите свойства электростатического поля вблизи поверхности и внутри проводников.
- 7.8. Какова связь между напряженностью поля вблизи поверхности проводника и поверхностной плотностью зарядов?
- 7.9. Покажите, что следующие определения потенциального поля эквивалентны:
  - а) поле, в котором работа не зависит от траектории перемещения и определяется только начальной и конечной точками траектории;
  - б) поле, в котором работа по замкнутой траектории равна нулю.
- 7.10. Поясните принцип измерения потенциала в некоторой точке между электродами.
- 7.11. Опишите графический способ задания электростатического поля с помощью линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей.
- 7.12. Нарисуйте приблизительную картину линий напряженности и эквипотенциальных линий заряженных тел: а) сферы; б) куба; в) конуса; г) эллипса.

## **8. Литература**

- 8.1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 2. М.: Наука, 1998 г.
- 8.2. Савельев И.В. Курс физики. Т. 1. М.: Наука, 1989 г.
- 8.3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1990 г.