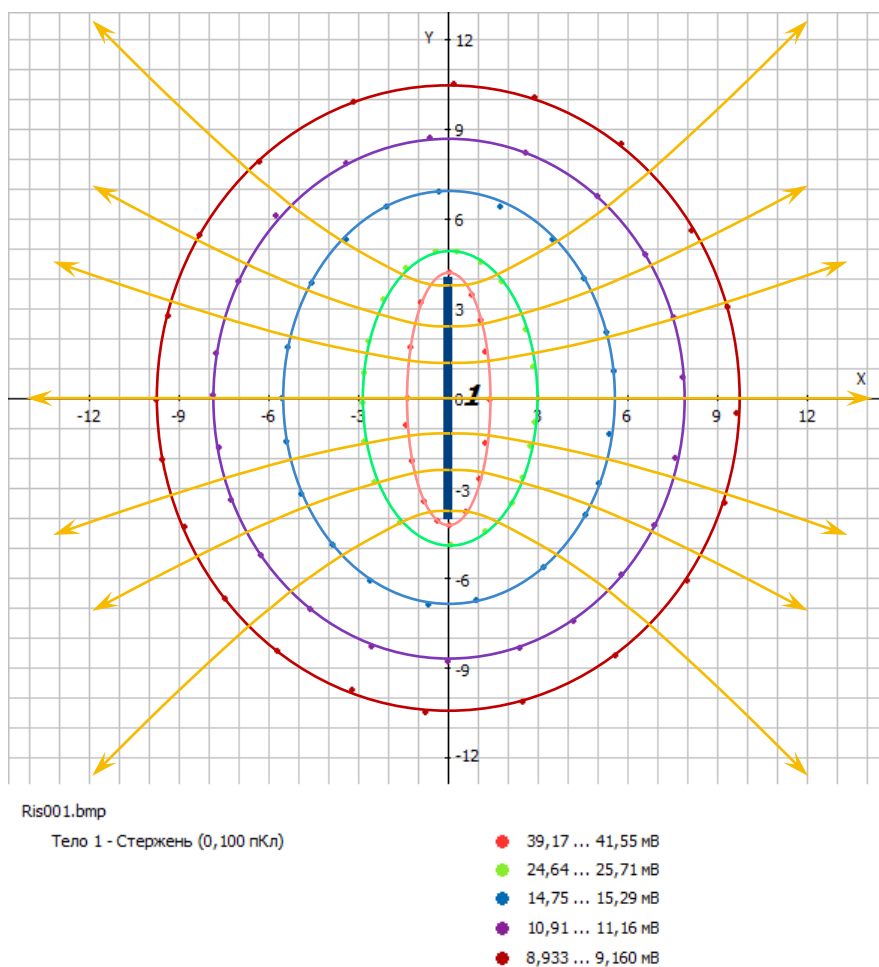


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



А.Г. Рипп, В.В. Довгаленко

Линии электростатического поля

Учебное пособие по общей физике
для студентов технических
и естественно-научных специальностей

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 53.08 (075.8)

Р 537

Рецензент:

А.Н. Бакулина – кандидат технических наук, доцент

Рипп А.Г.

Р 537 Линии электростатического поля: учебное пособие по общей физике / А.Г. Рипп, В.В. Довгаленко. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 12 с.

Учебное пособие разработано преподавателями кафедры «Физика» СевГУ и предназначено для студентов 1 и 2 курсов технических и естественно-научных специальностей, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам: «физика» и «физический практикум». В пособии студентам предлагается познакомиться с методами теоретического исследования электростатических полей и экспериментальной проверки теоретических зависимостей потенциала, созданного заряженными телами, от координат. Лабораторная установка, на которой предлагается провести эксперименты, виртуальная.

Пособие содержит краткий теоретический материал, описание лабораторной установки, порядок выполнения лабораторной работы и методы оценки погрешности измерений. Материал изложен подробно и в доступной форме. Для студентов, желающих получить больше информации, в конце пособия приводится список литературы.

УДК 53.08 (075.8)

Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Физика», протокол № 6 от 31 января 2018 г.

Работа 35Б. Линии электростатического поля

Цель работы

Построение эквипотенциальных линий и линий напряжённости.

1. Краткая теория

Электростатическое поле – это электрическое поле, созданное неподвижными электрическими зарядами. Оно обладает свойством *стационарности* (статичности) – все его свойства с течением времени не изменяются. Основной характеристикой электрического поля является напряжённость, а если поле – электростатическое, то этих характеристик две: *напряжённость* и *потенциал*.

1.1. Напряжённость

На заряженное тело в электрическом поле действует сила, которая называется *электрической*. Величина и направление этой силы определяется двумя независимыми факторами:

- зарядом тела, его формой и размерами,
- свойствами электрического поля в области расположения тела.

Простейшей моделью заряженного тела является точечный заряд. Это – заряженная материальная точка. У материальной точки, по определению, нет размеров и формы, поэтому электрическая сила $\mathbf{F}$, действующая на точечный заряд, зависит только

- от величины заряда q и координат точки, в которой находится заряд,
- от свойств поля в точке расположения заряда.

Этот факт можно математически представить в следующем виде:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}, \quad (1.1)$$

где вектор $\mathbf{E}$ называется *напряжённостью электрического поля*. Напряжённость $\mathbf{E}$ полностью характеризует электрическое поле – в каждой его точке, поэтому данная величина и относится к основным характеристикам электрического поля.

Важным свойством напряжённости является то, что она подчиняется *принципу суперпозиции*. Этот принцип состоит в следующем. Если заряженное тело 1 создаёт электрическое поле с напряжённостью $\mathbf{E}_1$, а заряженное тело 2 – поле с напряжённостью $\mathbf{E}_2$, то оба тела вместе создают электрическое поле с напряжённостью

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2.$$

Наглядной графической картиной электрического поля является семейство линий напряжённости. *Линия напряжённости* – это воображаемая линия, которая проводится так, что направление касательной к этой линии в каждой её точке совпадает

с направлением напряжённости $\mathbf{E}$. Пример семейства линий напряжённости показан на рисунке 1.1.

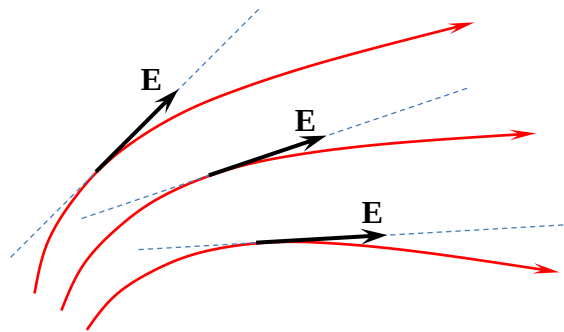


Рис. 1.1. Линии напряжённости

Отметим важные особенности линий напряжённости.

- Линии напряжённости электрического поля имеют *направление*.
- Линии напряжённости имеют *начало* и *конец* – они начинаются на положительных электрических зарядах, а кончаются на отрицательных.
- Линии напряжённости *не пересекаются* друг с другом.
- Если в некоторой области A линии напряжённости проходят гуще, чем в области B , то величина напряжённости в области A больше, чем в области B : $E_a > E_b$.

1.2. Потенциал

Электростатическая сила является консервативной. Поэтому всякое заряженное тело в электростатическом поле обладает потенциальной энергией, которая, как и электрическая сила, определяется двумя независимыми факторами:

- зарядом тела, его формой и размерами,
- свойствами электрического поля в области расположения тела.

А если тело – это точечный заряд, то его потенциальная энергия W_p зависит только

- от величины заряда q и координат точки, в которой находится заряд,
- от свойств поля в точке расположения заряда.

Этот факт можно по аналогии с формулой (1.1) $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ представить в следующем виде:

$$W_p = q\varphi,$$

где скалярная величина φ называется *потенциалом электростатического поля* или *электрическим потенциалом*. Как и напряжённость $\mathbf{E}$, электрический потенциал φ полностью характеризует электрическое поле в каждой его точке, поэтому потенциал тоже считается *основной* характеристикой электростатического поля.

Потенциальная энергия определена с точностью до произвольной постоянной. Иными словами, можно произвольно выбирать точку, в которой назначается нулевое

значение потенциальной энергии. Этим же свойством обладает и электрический¹ потенциал.

Потенциал, как и напряжённость, удовлетворяет принципу суперпозиции: если заряженное тело 1 создаёт электростатическое поле с потенциалом φ_1 , а заряженное тело 2 – поле с потенциалом φ_2 , то оба тела вместе создают электрическое поле с потенциалом

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2.$$

Правда, в этой формуле сумма, в отличие от принципа суперпозиции для напряжённости, – не векторная, а *скалярная*.

Используя понятие потенциала, электростатическое поле можно наглядно представить в виде семейства *эквипотенциальных* поверхностей.

Определение 1. *Эквипотенциальная поверхность* – это поверхность *равного потенциала*, то есть геометрическое место точек, в которых потенциал имеет одно и то же значение.

Обычно электрическое поле изображают в виде его сечения какой-либо плоскостью. В этом случае эквипотенциальные поверхности превращаются в *эквипотенциальные линии*.

Эквипотенциальные поверхности и линии обладают следующими свойствами.

- Они *не имеют направления*.
- Они *замкнутые*, так что не имеют ни начала, ни конца.
- Они *не пересекаются* друг с другом.
- Эквипотенциальные поверхности (линии) и линии напряжённости взаимно *ортогональны*, то есть перпендикулярны другу.

На рисунке 1.2 для примера показаны линии напряжённости и эквипотенциальные линии электростатического поля, созданного положительным точечным зарядом. Красные линии – это линии напряжённости, а зелёные – эквипотенциальные линии.

Тот факт, что и напряжённость, и потенциал являются *полными* характеристиками электростатического поля, означает, что они связаны друг с другом. Эта связь выражается следующими двумя формулами.

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi, \tag{1.3}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_\ell d\ell. \tag{1.4}$$

Первая из формул определяет связь напряжённости с потенциалом, вторая – обратную связь: потенциала с напряжённостью.

¹ В дальнейшем для краткости электрический потенциал будем называть одним словом «потенциал», а напряжённость электрического поля одним словом «напряжённость».

Величина $\text{grad}\varphi$ – это вектор, называемый *градиентом потенциала*². Данный вектор направлен в сторону наиболее быстрого возрастания потенциала, а его численное значение равно производной $\frac{d\varphi}{d\ell}$, которая называется производной по направлению. Направление, вдоль которого эта производная вычисляется, совпадает с направлением градиента. Проекциями градиента потенциала на оси декартовой системы координат OX , OY и OZ являются соответственно производные $\frac{\partial\varphi}{\partial x}$, $\frac{\partial\varphi}{\partial y}$ и $\frac{\partial\varphi}{\partial z}$.

Из вышесказанного следуют два важных факта.

- Проекции напряжённости на оси декартовой системы координат OX , OY и OZ связаны с потенциалом формулами:

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}.$$

- Линии напряжённости направлены в сторону *убывания* потенциала. (Обратите внимание на рисунок 1.2.)

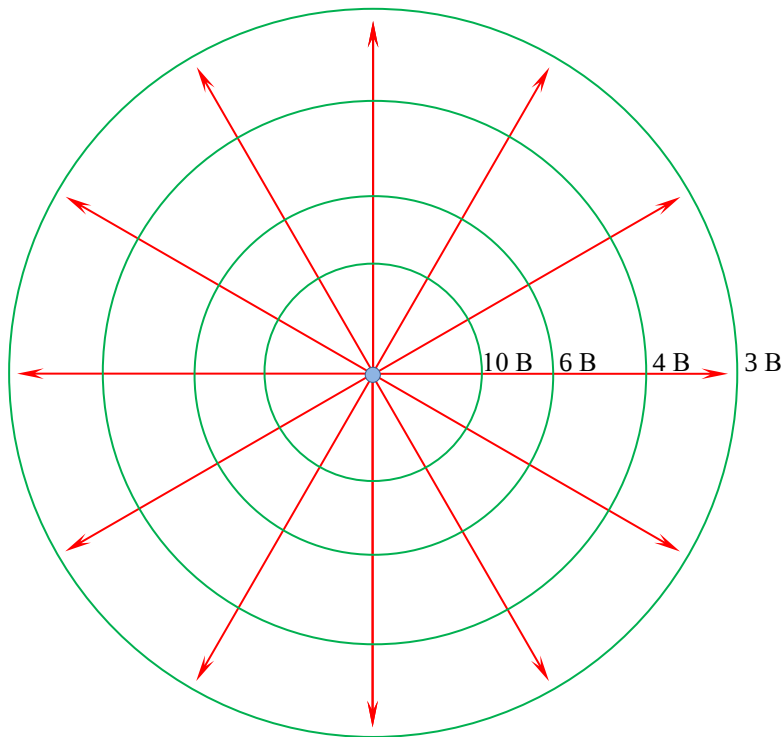


Рис. 1.2. Электростатическое поле точечного заряда

Интеграл в (1.4) называется *линейным интегралом*. Для его вычисления требуется задание некоторой линии (её называют *контуром*) – см. рисунок 1.3. Точка, в которой начинается контур, обозначена цифрой 1, а точка, в которой контур кончается, обозначена цифрой 2. Величина $d\ell$ – это длина бесконечно малого отрезка контура (*элемента*), а величина E_ℓ – это проекция вектора напряжённости $\mathbf{E}$ на направление элемента.

² В общем случае, градиент – это одна из характеристик всякой скалярной функции координат. Например, есть градиент температуры среды, градиент плотности, градиент освещённости и т.д.

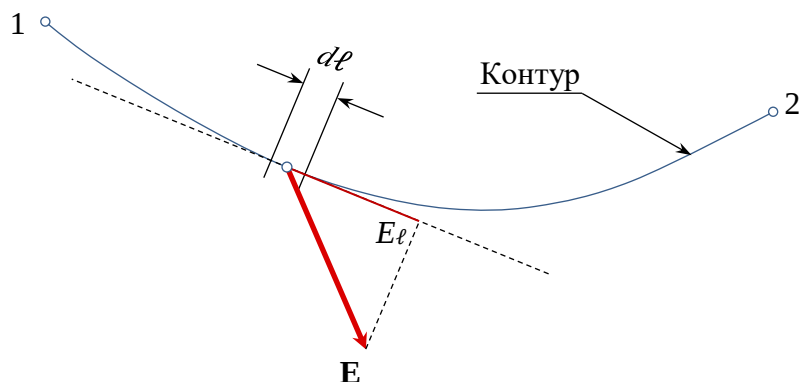


Рис. 1.3. Иллюстрация к понятию линейного интеграла

Если контур — замкнутый, то линейный интеграл называется *циркуляцией* и обозначается так: $\oint E_\ell d\ell$.

Из формулы (1.4) следуют два очень важных свойства напряжённости.

Первое свойство

Линейный интеграл от напряжённости электростатического поля не зависит от контура интегрирования, а зависит только от координат начальной и конечной точек контура.

Это свойство используется при вычислении разности потенциалов между двумя точками: так как контур, соединяющий эти точки, произволен, то его выбирают так, чтобы *упростить* интегрирование.

Второе свойство.

Циркуляция напряжённости электростатического поля для любого контура равна нулю.

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка виртуальная, то есть представляет собой компьютерную программу, имитирующую реальную установку. Программа разработана в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

При запуске программы открывается окно «Электростатическое поле».

В центральной части окна приведены цель работы и краткое описание работы. Внизу окна — три управляющие кнопки:

- **Ход работы.** При нажатии этой кнопки открывается окно, в котором показан порядок выполнения работы. Эту кнопку нажимать *не надо*, так как в данном пособии вам предлагается порядок выполнения лабораторной работы, который несколько отличается от того, который предлагают разработчики программы.
- **Эксперимент.** При нажатии на эту кнопку открывается окно с экспериментальной установкой.
- **Завершение работы.** Эта кнопка вызывает выход из программы.

Окно «Эксперимент» показано на Рис. 2.1. Оно содержит два раздела: инструментальную панель (слева) и область эксперимента (справа).

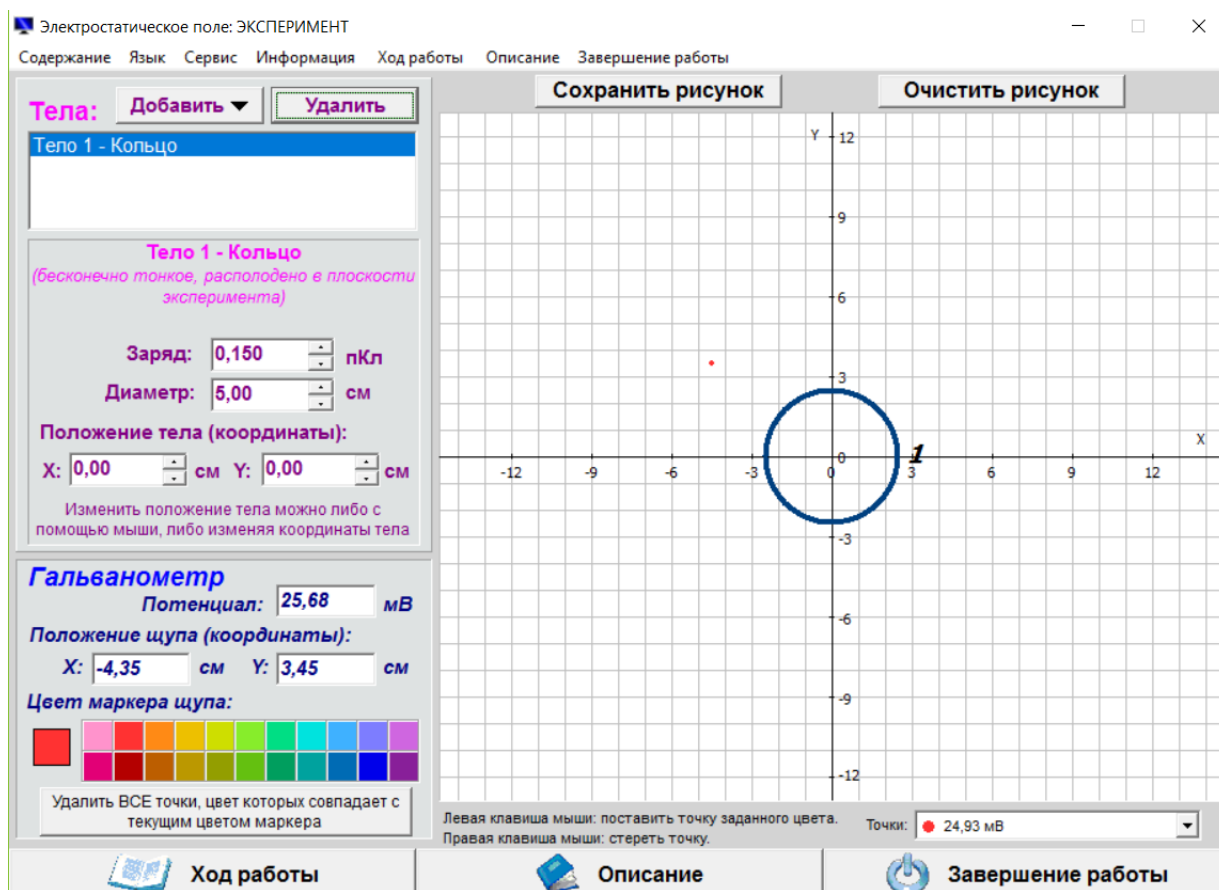


Рис. 2.1. Окно «Эксперимент»

1. В области эксперимента вы видите плоское сечение электростатического поля, содержащее следующие элементы.
 - Заряженное тело, создающее электрическое поле. Тел может быть несколько, возле каждого из них стоит номер. На рисунке 2.1 тело одно, это – тонкое кольцо с номером 1.
 - Координатная сетка XOY .
 - Щуп (курсор, имеющий вид *маркера*) – он на рисунке не показан.
 - Точки, отмеченные щупом. Чтобы отметить точку, к ней надо подвести зонд и нажать на левую клавишу мыши. Цветом точки можно управлять – для этого на инструментальной панели (слева) есть палитра «Цвет маркера». На рисунке 2.1 показана одна красная точка во втором квадранте.
 - Две кнопки: «**Сохранить рисунок**» и «**Очистить рисунок**». С помощью первой кнопки можно в специальном буфере сохранять рисунок электрического поля с заряженными телами и отмеченными точками для того, чтобы потом можно было этот рисунок вставлять в отчёт. При нажатии второй кнопки рисунок из специального буфера удаляется.
 - Окно «Точки» предназначено для сохранения границ измеренных значений потенциала в отмеченных точках (φ_{min} ; φ_{max}). На рисунке 2.1 отмечена только одна точка, поэтому в окне «Точки» хранится одно число 24,93 мВ.
2. Инструментальная панель содержит два раздела. Вверху – раздел «**Тела**» для выбора формы заряженных тела, их размеров, положения и зарядов. Внизу – раздел «**Гальванометр**» для измерения потенциала и координат точки поля.

Раздел «Тела».

- В работе предусмотрены пять видов заряженных тел: точечный заряд, стержень, кольцо, полукольцо и диск. Для того чтобы добавить тело в область эксперимента, надо в разделе «Тела» нажать кнопку «Добавить», в результате чего раскрывается список тел. Для выбора тела надо нажать левую кнопку мыши. После этого тело автоматически помещается в центр области эксперимента, а его название появляется в окне раздела «Тела». На рисунке 2.2 в окне раздела «Тела» вы видите запись: **Тело 1 - Кольцо**. Для удаления тела из области эксперимента рядом с кнопкой «Добавить» расположена кнопка «Удалить».
- Для задания величины заряда тела Q и его размера предусмотрены два окна с кнопками: «Заряд» и «Размер».
- Для перемещения тела из центра области эксперимента есть два окна с кнопками «X:» и «Y:». Они определяют координаты центра тела. В исходном состоянии тело располагается в центре области эксперимента, а числа в окошках «X:» и «Y:» – нули.
Тело можно перемещать и иначе – захватив его курсором при нажатой левой клавишей мыши.
- В области эксперимента можно расположить не только какое-то одно тело, но и несколько тел – как разных, так и одинаковых.

Раздел «Гальванометр».

- Если курсор переместить в область эксперимента, то он приобретает форму маркера. Этот маркер является имитатором устройства, которое в реальной установке называется «электрический зонд», а в данной виртуальной установке – «щуп». Зонд соединяется электрическим проводником с гальванометром, который измеряет потенциал зонда. В данной виртуальной установке раздел «Гальванометр» предназначен не только для измерения потенциала электрического поля в точке расположения щупа, но и для измерения координат щупа. Значение потенциала и координат высвечиваются в окнах «Потенциал», «X:» и «Y:».

3. Порядок выполнения работы

3.1. Нажмите кнопку «Эксперимент» и обратитесь к преподавателю для того, чтобы он выбрал для вас заряженные тела и их характеристики: заряд, размеры и положение в области эксперимента. После этого заполните таблицу 1 «Условия экспериментов». Вместо слова «Размер» следует писать:

- «Длина», если тело – стержень,
- «Диаметр», если тело – кольцо, полукольцо или диск.

Если тело – «Точечный заряд», то ячейку «Размер» заполнять не надо.

Таблица 1

Условия экспериментов

Тело 1		
Размер	см	
Заряд	пКл	
Тело 2		
Размер	см	
Заряд	пКл	

- 3.2. Выберите цвет маркера и обратитесь к преподавателю, чтобы он указал вам точку, с которой вы начнёте искать эквипотенциальную линию №1. Отметьте маркером эту точку, затем запишите в таблицу 2 значение потенциала и цвет точки.

Таблица 2

Параметры эквипотенциальных линий

Номер линии	Цвет точек	Потенциал
1		мВ
2		
...		
...		

- 3.3. Переместите щуп примерно на 2 см вверх и, слегка двигая щуп влево-вправо, найдите точку, потенциал в которой тот же, что и в предыдущей отмеченной вами точке. Отметьте и эту точку – тем же цветом.
- 3.4. Повторяйте операцию 3.3, перемещая щуп от точки к точке каждый раз примерно на 2 см и отмечая точки, до тех пор, пока щуп не окажется на оси ОУ или совсем рядом с ней. После этого переместите щуп во второй квадрант и отметьте там тоже точки с тем же потенциалом. Расстояние между отмечаемыми точками должно быть по-прежнему примерно 2 см. Ошибочно отмеченные точки можно стереть однократным щелчком правой кнопки мыши.
- 3.5. Найдите и отметьте точки с тем же потенциалом в третьем и четвёртом квадрантах. На этом процедуру отыскания эквипотенциальной можно считать законченной.
- 3.6. Смените цвет маркера и снова обратитесь к преподавателю, чтобы он указал вам точку, с которой вы начнёте искать эквипотенциальную линию №2. Отметьте маркером эту точку, затем запишите в таблицу 2 значение потенциала и цвет точки. Прodelайте снова пункты 3.3 – 3.5.
- 3.7. Прodelайте процедуру отыскания эквипотенциальных линий не менее 5 раз. После этого попросите у преподавателя, чтобы он указал точку, в которой вам надлежит при подготовке отчёта определить потенциал и напряжённость.

- 3.8. Нажмите кнопку «Сохранить рисунок», затем в ответ на запрос программы укажите тип и имя файла, в котором будет сохранена картина поля.
- 3.9. Очистите область эксперимента. Это можно сделать двумя способами.
- С помощью кнопки «**Удалить**». В этом случае область эксперимента становится пустой и обнуляются все окна на инструментальной панели.
 - С помощью кнопки «**Очистить рисунок**». В этом случае в области эксперимента стираются все отмеченные маркером точки, а заряженные тела остаются.
- 3.10. Перенесите рисунок из файла, где вы его сохранили, в EXCEL-файл, в котором вы оформляете свой отчёт. После этого на вкладке «Вставка» выберите «Фигуры», затем «Кривая» и аккуратно соедините плавными линиями точки равного потенциала, в результате чего вы получите семейство эквипотенциальных линий.
- 3.11. Постройте семейство линий напряжённости. Количество линий в семействе – не менее восьми. Порядок построения каждой линии следующий.
- На самой ближней к одному из заряженных тел эквипотенциальной линии выберите произвольную точку и отметьте её, нарисовав пустой кружок диаметром 2 мм.
 - Найдите на ближайшей эквипотенциальной линии точку, расстояние до которой от выбранной вами точки *минимально*, и тоже отметьте эту точку.
 - Аналогично отметьте точки на всех последующих эквипотенциальных линиях.
 - Все отмеченные точки соедините плавной линией и продлите эту линию до заряженных тел.
 - Укажите стрелкой направление линии напряжённости – как указано в пункте 1, линии напряжённости направлены в сторону *убывания* потенциала.
- 3.12. Определите потенциал и напряжённость в точке, указанной преподавателем.
- Это делается так. Значение потенциала можно считать средним между потенциалами тех двух эквипотенциальных линий (*A* и *B*), которые
- ближе всего к данной точке,
 - находятся по разные стороны от точки.
- Для нахождения напряжённости в указанной точке надо сначала провести через эту точку линию напряжённости до её пересечения с эквипотенциальными линиями *A* и *B*. После этого напряжённость можно оценить по формуле:
- $$E = \frac{\Delta\varphi}{d},$$
- где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между эквипотенциальными линиями *A* и *B*, *d* – расстояние между этими линиями вдоль линии напряжённости.
- 3.13. Обратите внимание на эквипотенциальные линии и напишите в отчёте, каков характер этих линий. Например, что в них общего и как они изменяются по мере изменения потенциала.

- 3.14. Обратите внимание на линии напряжённости и напишите в отчёте, каков характер этих линий. Например, что в них общего, как они ведут себя вблизи заряженных тел и вдали от них, что отличает их от эквипотенциальных линий.
- 3.15. Сформулируйте общие выводы по лабораторной работе.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Что такое электростатическое поле?
- 4.2. Что такое напряжённость электростатического поля?
- 4.3. В чем заключается принцип суперпозиции электрических полей?
- 4.4. Что такое линии напряжённости?
- 4.5. Какими свойствами обладают линии напряжённости?
- 4.6. Что такое потенциал электрического поля?
- 4.7. Что такое эквипотенциальные поверхности и линии?
- 4.8. Какими свойствами обладают эквипотенциальные поверхности и линии?
- 4.9. Как связаны друг с другом потенциал и напряжённость электрического поля?
- 4.10. Какая связь между распределением электрического потенциала и направлением линий напряжённости электрического поля?
- 4.11. Для чего предназначен гальванометр, используемый в данной работе?
- 4.12. Что такое «электрический зонд»?

5. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 5.1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. – М.: Наука, 1977–1985г.
- 5.2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. – М., Наука, 1989.
- 5.3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М., Высшая школа, 2003.
- 5.4. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Лабораторный практикум по изучению моделей физических процессов на компьютере. – Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2007.

**Рипп Александр Гешелевич
Довгаленко Владимир Васильевич**

Линии электростатического поля

Учебное пособие по общей физике

В авторской редакции

Изд. № 27/18. Объём: 0,75 п. л.

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»