

Методические указания

И.Б. Винтайкин, Ю.Ю. Инфимовский, А.С. Чуев

Лабораторная работа Э-111

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

2023 год

Изучение электростатического поля

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является изучение законов электростатики и экспериментальное исследование электростатического поля в простейших случаях.

2. Задача лабораторной работы

Задачей работы является экспериментальное исследование распределения потенциалов в электростатических полях различной конфигурации (конфигурация поля определяется геометрией электродов.). На практике для качественного исследования электростатического поля применяют методы моделирования. В данной работе используется метод электролитической ванны, в которой изучение электростатического поля заменяется изучением поля стационарного тока в слабопроводящей среде.

3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

Лабораторная установка показана на рис. 1.

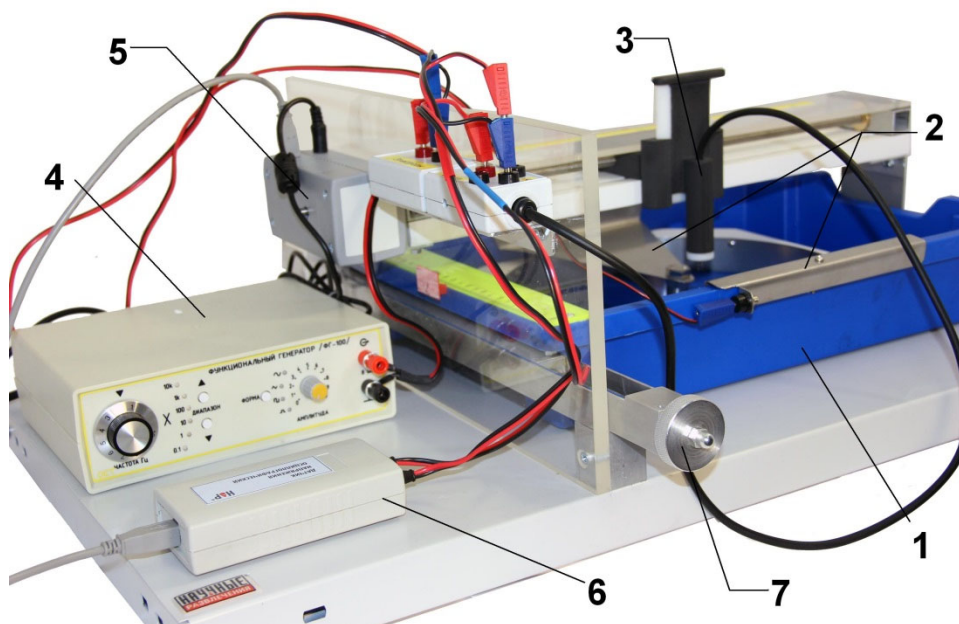


Рис. 1

Она включает в себя ванну для электролита 1, комплект электродов 2; зонд 3; источник тока (генератор импульсов) 4; систему автоматического позиционирования зонда по оси x 5, устройство ручного позиционирования зонда (ванны) вдоль оси y 7.

К приборам и принадлежностям относятся компьютер с необходимым

программным обеспечением, двухканальный осциллографический датчик напряжения 6 для регистрации электрической разности потенциалов, соединительные кабели для подключения датчиков.

4. Теоретическая часть

Электростатическое поле может быть описано как с помощью векторной величины - напряженности поля \vec{E} , так и с помощью скалярной величины - потенциала φ . Определим связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля. Если учесть, что напряженность поля пропорциональна силе \vec{F} , действующей на заряд Q в данной точке электростатического поля

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

а потенциал пропорционален потенциальной энергии W_p этого заряда в данной точке

$$\varphi = \frac{W_p}{Q}, \quad (2)$$

то легко сообразить, что связь между ними должна быть аналогичной связи между потенциальной энергией и силой, известной из механики

$$\vec{F} = -grad W_p. \quad (3)$$

Тогда, совместив вместе формулы (1), (2) и (3), получим

$$Q\vec{E} = -grad Q\varphi \quad (4)$$

Сократив левую и правую части равенства на постоянную величину Q , получим выражение, определяющее связь между напряженностью и потенциалом

$$\vec{E} = -grad \varphi. \quad (5)$$

Для наглядного изображения поля можно вместо силовых линий напряженности воспользоваться поверхностями равного потенциала или эквипотенциальными поверхностями. Если потенциал задан как функция координат $\varphi(x,y,z)$, уравнение эквипотенциальной поверхности имеет вид:

$$\varphi(x,y,z) = const. \quad (6)$$

Таким образом, *эквипотенциальные поверхности* - это геометрическое место точек с одинаковым потенциалом.

Силловые линии электростатического поля в любой точке ортогональны (перпендикулярны) эквипотенциальным поверхностям.

Эквипотенциальную поверхность можно провести через любую точку поля, следовательно, таких поверхностей можно провести бесконечное множество. Однако условились проводить поверхности таким образом, чтобы разность потенциалов $\varphi_{i+1} - \varphi_i$ для двух соседних поверхностей была повсюду одна и та же. Тогда по густоте эквипотенциальных поверхностей можно судить о величине напряженности поля. Чем гуще располагаются эквипотенциальные поверхности, тем быстрее изменяется потенциал при перемещении по нормали к поверхности. Следовательно, тем больше в этом месте $\text{grad } \varphi$, а значит и E .

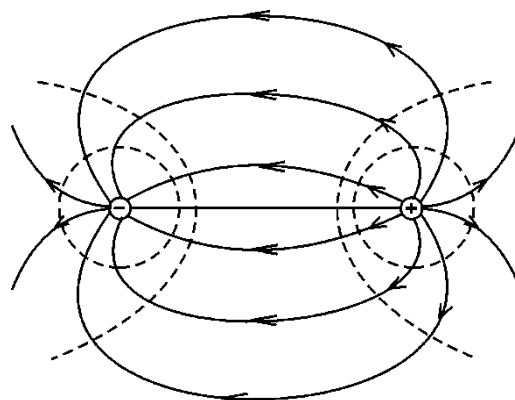


Рис. 2

На рис. 2 в качестве примера приведена картина расположения силовых (сплошные) линий и эквипотенциальных (пунктирные) линий для диполя – двух одинаковых зарядов разного знака, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга.

В данной лабораторной работе мы будем изучать распределение потенциала в полях, созданных следующими комбинациями электродов:

- 1) плоскопараллельные пластины;
- 2) цилиндр и плоскость;
- 3) коаксиальные цилиндры.

Изучив распределение потенциала в этих полях, можно будет построить соответствующие наборы эквипотенциальных поверхностей.

В данной работе протеканием тока в тонком слое жидкости моделируется электростатическая задача с бесконечной протяженностью электродов в направлении, перпендикулярном плоскости ванны.

Хорошо известно, что электрическое поле между двумя параллельными бесконечными заряженными плоскостями является однородным. В реальной ситуации из-за конечности размеров пластин однородность поля вблизи их краёв нарушается. Это называется «краевым эффектом». В данной работе вам предстоит получить экспериментальные данные о реальном распределении потенциала и напряжённости поля между плоскопараллельными электродами

оценить степень однородности поля на оси симметрии такой конструкции.

Следует отметить, что картина силовых линий и эквипотенциальных поверхностей, изображённая на рис. 2 является симметричной. Этот факт даёт нам возможность моделировать половину такой картины. Для этой цели в данной работе используется конфигурация электродов «плоскость-цилиндр малого радиуса». При этом некоторые отличия экспериментальных кривых от рис. 2 также будут обусловлены влиянием краевых эффектов.

В третьей части настоящей лабораторной работы изучается распределение потенциала и напряжённости электрического поля между коаксиальными цилиндрическими электродами. При этом полученные экспериментальные данные следует сравнить с хорошо известной теоретической зависимостью потенциала и напряжённости поля от координаты для данной конфигурации электродов:

$$U(r) = \varphi(r) - \varphi(R_2) = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot \ln \frac{R_2}{r}, \quad (7)$$

$$E(r) = \frac{U_0}{r \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}. \quad (8)$$

Здесь R_2 и R_1 - это радиусы внешнего и внутреннего электродов соответственно, а U_0 - напряжение, поданное на электроды.

5. Описание лабораторной установки

Установка для проведения исследования представляет собой плоскую ванну, в которую наливается электролит (водаснебольшим количеством поваренной соли). В ванну помещают электроды различной формы: плоские, цилиндрические и т.д. (рис. 3). Электроды соединяют с источником тока. Таким образом, в электролите возникает поле, которое подлежит исследованию.

Для построения эквипотенциальных поверхностей необходимо определить потенциалы точек и координаты этих точек. Для измерения потенциала в конкретной точке используется четырёхэлектродный зонд. Благодаря четырёхэлектродной конструкции зонд позволяет измерять не только потенциал поля в точке, но и градиент потенциала в её окрестности (т.е. напряжённость \vec{E} электростатического поля).

Чтобы понять механизм измерений, производимых зондом, рассмотрим рис. 3. На нём электроды зонда условно обозначены буквами *A*, *B*, *C*, *D*. (Расположение электродов на рисунке соответствует их расположению относительно пользователя данной лабораторной установки). Электроды,

создающие в ванне изучаемое поле, обозначены римскими цифрами **I** и **II**. Первый канал осциллографического датчика подключается к электродам **I** и **A** и измеряет разность потенциалов U_1 между ними. Второй канал осциллографического датчика подключается к электродам зонда **A** и **B** и измеряет разность потенциалов U_2 между ними. Потенциал φ электростатического поля в центре зонда, измеренный относительно электрода **I** определяется следующим выражением:

$$\varphi = U_1 + \frac{U_2}{2}.$$

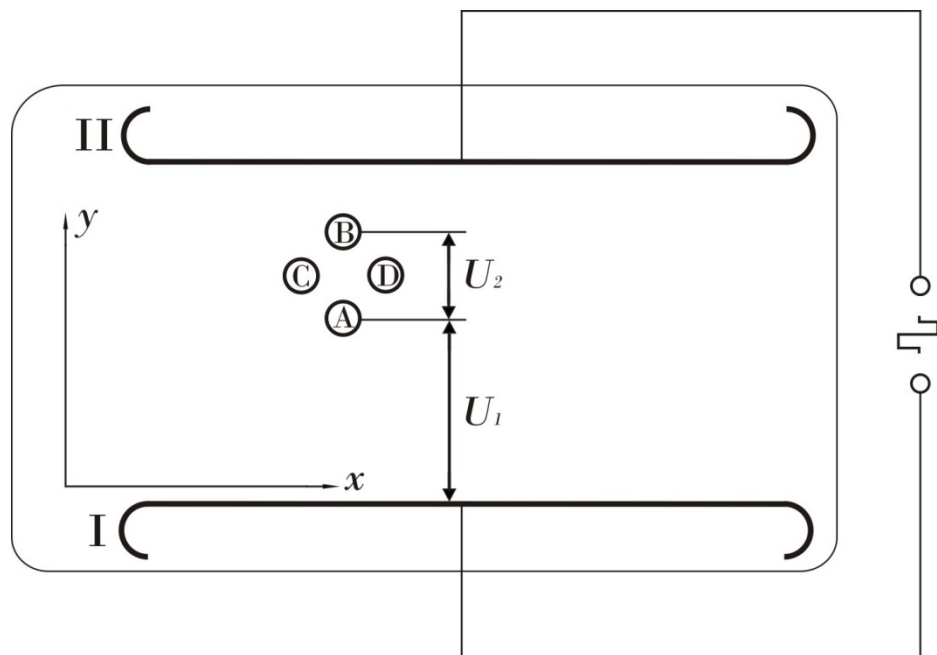


Рис. 3

Если предположить что потенциал поля между электродами **A** и **B** изменяется линейным образом (такое предположение вполне оправдано, учитывая малое межэлектродное расстояние), то приближённое значение проекции напряженности электрического поля на ось y в исследуемой точке может быть найдено по формуле:

$$E_y = \frac{U_2}{d_{AB}},$$

где d_{AB} - расстояние между электродами **A** и **B**.

Аналогичным образом, если второй канал осциллографа подключить к электродам **C** и **D**, то приближённое значение проекции напряженности электрического поля на ось x в исследуемой точке может

быть найдено по формуле:

$$E_x = \frac{U}{d_{CD}},$$

где d_{CD} - расстояние между электродами **C** и **D**.

Для изменения координаты зонд установлен на подвижной каретке, которая может перемещаться вдоль оси x благодаря винтовому механизму подачи с электрическим приводом. Управление приводом может осуществляться либо автоматически в определённом сценарии практикума, либо вручную с помощью экранных кнопок «>0<» «Назад» и «Вперед», расположенных в верхней части окна устройства перемещения зонда. Подача ванны вдоль оси y осуществляется только вручную вращением винтового механизма 7.

Для определения текущей координаты зонда вдоль осей x и y закреплены линейки.






В данной работе в качестве источника напряжения между электродами I и II используется генератор, который подаёт на них прямоугольные двуполярные импульсы на частоте **4-5кГц**. При подаче высокочастотного сигнала на электроды удаётся исключить влияние приэлектродных эффектов на общую картину поля между электродами и избежать электролиза. Для повышения точности измерений (особенно при малых значениях напряжения) все напряжения рассчитываются как половина разности сигналов на положительном и отрицательном полупериоде.

6. Порядок проведения лабораторной работы






6.1. Изучение потенциала в системе плоскость-плоскость в автоматическом режиме






1. Заполните кювету водой (2 л) и растворите в ней 15 грамм поваренной соли. Установите в кювете электродную систему «плоскость — плоскость». Обратите внимание, что плоские электроды имеют кронштейны разной длины. Электрод с более коротким кронштейном устанавливается так, чтобы его Y -координата была меньше, чем Y -координата электрода с длинным кронштейном.
2. С помощью соединительных проводов подключите электроды к клеммной колодке с соответствующей надписью. При этом электрод с меньшим значением Y -координаты (электрод I) подключается к черной клемме, а электрод с большим значением Y -координаты (электрод II) – к красной. При этом потенциал электрода I принимается за точку отсчета потенциала.
3. Включите генератор и блок питания устройства перемещения зонда.
4. С помощью соединительных кабелей подключите к USB-входам

компьютера осциллографический датчик и устройство перемещения зонда.


5. Включите компьютер, запустите программу «Практикум по электростатике». На экране автоматически появится окно выбора сценария работы. Закройте его. Подключите первый канал осциллографического датчика (кабель, соответствующий этому каналу имеет красную метку) к электродам и с контролем по осциллографическому датчику настройте режим работы генератора, установив следующие параметры:
 - частота — 4 - 5 кГц
 - форма импульсов — прямоугольные, двуполярные
 - амплитуда сигнала на электродах — 4.9 - 5 В.
6. Регистрация сигнала осциллографическим датчиком начинается при нажатии кнопки «Пуск» . (Одновременно начинает двигаться и устройство перемещения зонда, которое остановится автоматически, достигнув крайне правого положения.) Посмотреть и при необходимости изменить параметры представления сигнала (развертка, чувствительность и т.п.) можно, нажав экранную кнопку , которая доступна после нажатия кнопки «Стоп»  (или до нажатия «Пуск»).
7. С помощью кнопки  вызовите на экран меню выбора работы и выберите пункт «Электростатика», а в нем сценарий «Регистрация потенциалов в автоматическом режиме». Каретка зонда при этом переместится в начало оси X. В дальнейшем для возврата каретки зонда в исходное положение (если это не произошло автоматически) следует использовать экранную кнопку .
8. Переключите измерительные кабели осциллографического датчика следующим образом. Синий штекер первого канала подключите к электроду I кюветы, а красный штекер - к электроду A зонда (см. обозначения на рис. 3). Второй канал включите на измерение напряжения между электродами зонда, расположенными вдоль направления оси Y. При этом к электроду A должен быть подключены штекер синего цвета кабеля второго канала (измерительный кабель второго канала имеет синюю метку). Проверьте, чтобы чувствительность осциллографического датчика по первому каналу соответствовала 1В/дел, а по второму – 0.3В/дел.
9. Установите зонд в кронштейн так, чтобы его электроды погрузились в электролит на 4 – 6мм и, вращая рукоятку устройства перемещения кюветы, выберите начальную Y-координату **65 мм**. (Координаты электродов составляют $Y_I=55$ мм и $Y_{II}=205$ мм).
10. Внесите в таблицу окна сбора данных параметры сетки сканирования. Для этого произведите следующие действия:
 - В поле «Минимум Y» введите значение «65».
 - В поле «Максимум Y» введите значение «195».

- В поле «Шаг по оси Y» введите значение 5.
- В поле «Минимум X» введите значение 0.
- В поле «Максимум X» введите значение 300.
- В поле «Шаг по оси X» введите значение 5.


11. Нажмите кнопку  для обновления таблицы сбора данных. Убедитесь, что значения в полях «Позиция по оси Y» и «Позиция по оси X» равны значениям, которые находятся в полях «Минимум Y» и «Минимум X» соответственно. Если это не так, то установите нужные значения с помощью кнопок .
12. Нажмите кнопку «старт/стоп» , которая находится в окне «Сбор данных». Каретка с зондом начнет движение, а ячейки таблицы на экране будут заполняться значениями потенциала в соответствующих точках проводящей среды. Алгоритм расчета потенциала в автоматическом режиме измерений следующий. При неподвижной каретке определяется среднее значение амплитуды колебаний напряжения $U_{cp} = (U_+ - U_-) / 2$ по каждому из каналов (половина разности между напряжением положительного U_+ и отрицательного U_- полупериодов). Потенциал в точке, соответствующей «центру» зонда находится по формуле $U = U_{cp}^{(1)} + U_{cp}^{(2)} / 2$ (верхние индексы обозначают номер канала). Малое расстояние между электродами зонда позволяет с хорошей точностью считать изменение потенциала между ними линейным.
13. После остановки каретки переместите кювету в соответствии с выбранным шагом по оси Y. В окне «Сбор данных» установите новое значение в поле «Позиция по оси Y». Снова нажмите «старт/стоп» . Данные будут регистрироваться аналогичным образом при обратном движении каретки с зондом.
14. Повторяйте действия, описанные в пунктах 12-13, последовательно сканируя потенциал поля в межэлектродной области.
15. Если при сканировании Вы обнаружили ошибку в своих действиях (например, переместили кювету в новое положение и не ввели нового значения Y-координаты), то Вам необходимо произвести следующие действия:
 - Остановить измерения. Для этого нажмите повторно кнопку «старт/стоп»  в окне «Сбор данных».
 - Исправить ошибку в ручном режиме. Для этого с помощью экранных кнопок устройства перемещения зонда вдоль оси X вернуть каретку в начало текущей строки сканирования (т.е. в положение, соответствующее координате флажка каретки зонда $X = \text{«Минимум X»}$ или $X = \text{«Максимум X»}$). Координату Y нужно установить вручную в соответствии с заполняемой строкой таблицы сбора данных.
 - В окне «Сбор данных» установить значение «Позиция по оси X», соответствующее установленной координате каретки зонда.







- Возобновить измерения нажатием кнопки «Старт/стоп»  в окне «Сбор данных».
16. После заполнения таблицы сбора данных перейдите на вкладку «3-хмерный график». Нажмите кнопку , и на экране появится график $U=U(x,y)$. Перенесите полученные данные в отчёт или сохраните файл с изображением этого графика, нажав на кнопку .
 17. Для получения картины эквипотенциальных линий перейдите на вкладку «График». В выпадающем списке выберите конфигурацию электродной системы «Плоскость-плоскость». В поле «количество срезов» введите количество эквипотенциальных линий (не более 15), которое Вы считаете нужным построить. Нажмите кнопку  для отображения на экране эквипотенциальных линий. Перенесите полученные данные в отчёт или сохраните файл с изображением этого графика, нажав на кнопку .

6.2. Изучение потенциала в системе цилиндр-плоскость в автоматическом режиме


1. Измените конфигурацию электродов, заменив плоский электрод с длинным кронштейном на цилиндрический электрод.
2. Геометрия цилиндрического электрода ограничивает ход зонда вдоль оси Y. Поэтому прежде чем приступить к сканированию потенциала, измените настройки сетки сканирования. Для этого произведите следующие действия в окне «Сбор данных»:
 - Установите в поле «Максимум Y» значение 125 (Y-координата центра цилиндрического электрода – 145 мм).
 - Обновите таблицу сбора данных, нажав кнопку .
3. Повторите процесс измерения распределения потенциала и обработки данных, как это было сделано в предыдущей части работы.
4. Перенесите полученные данные в отчёт.


6.3. Регистрация распределения потенциала и напряжённости поля вдоль характерного направления в системе плоскость-плоскость

1. С помощью кнопки  вызовите на экран меню выбора работы и перейдите ко второму пункту данной работы «Регистрация распределения потенциала и напряженности электрического поля вдоль характерных направлений». В качестве первого «характерного направления» рекомендуется выбрать ось симметрии электродной системы, имеющую X-координату 155 мм.

2. Установите в кювету второй плоский электрод, заменив им цилиндрический. Подключите красный штекер первого (красного) канала осциллографического датчика к выводу вновь установленного электрода. Установите максимальное выходное напряжение генератора и измерьте напряжение на электродах.
3. Войдя в меню настройки осциллографического датчика (кнопка ) , установите для первого канала чувствительность 5 В/дел. Далее выйдите из меню настройки и нажмите кнопку «Пуск» .
4. Остановите измерения, нажав кнопку , когда каретка устройства перемещения зонда окажется около отметки «155 мм». С помощью экранных кнопок «Назад» и «Вперед» установите выбранное положение каретки более точно. После этого отключите устройство перемещения каретки. Щелчком мышки на полосу в левой части экрана (содержащую символ \gg) откройте список датчиков и снимите галочку, соответствующую устройству «M201».
5. В оставшемся на экране окне осциллографического датчика установите малиновый маркер на верхней границе сигнала (маркер устанавливается нажатием левой кнопки мыши) - в верхней части экрана при этом значение напряжения. Внесите полученное значение U_0 в таблицу «исходные данные» окна обработки. Вызов таблицы осуществляется кнопкой .
6. Заполните остальные клетки данной таблицы: $D=4\text{мм}$ - расстояние между электродами зонда, $X=155\text{мм}$ - уравнение прямой, вдоль которой будет производиться сканирование потенциала. Заполните также таблицу «Конфигурация электродов»: $d=160\text{мм}$ - расстояние между плоскими электродами, $r_1=16\text{мм}$ - радиус закругления на краю электрода, $l=242\text{мм}$ - длина электродов.
7. Верните красный штекер кабеля первого канала осциллографического датчика на прежнее место — электрод A зонда.
8. Установите зонд на расстоянии 10 мм от электрода I и запустите измерения. Предупреждение программы о неполной сборке установки здесь следует проигнорировать. На осциллограмме красный луч представляет напряжение U_1 между электродами A и I (см. обозначения на рис. 3), а синий луч — напряжение U_2 между электродами зонда A и B , расположенными вдоль оси Y .
9. Остановите измерения, нажав кнопку , и зарегистрируйте полученные данные:
 - Установите малиновый и синий маркеры на максимальный и минимальный уровни горизонтальных участков сигнала первого канала (красный луч на осциллограмме), мысленно усреднив небольшие отклонения сигнала от постоянного в течении полупериода значения. Малиновый маркер устанавливается нажатием левой кнопки мыши, а синий – при нажатии правой кнопки мыши. Нажмите на кнопку .

красного цвета для добавления расстояния между маркерами (выраженного в вольтах) в таблицу данных (столбец напряжения U_1).

- После этого аналогичным образом установите малиновый и синий маркеры на верхний и нижний уровни сигнала второго канала (синий луч на осциллограмме). Нажмите на кнопку  синего цвета для добавления в таблицу данных напряжения U_2 .
- Запишите в столбец Y текущую координату зонда.

10. Для расчета потенциала в таблице реализован алгоритм, аналогичный использованному в автоматическом режиме. Для получения значения потенциала, соответствующего центру зонда, к амплитуде сигнала первого канала прибавляется половина амплитуды сигнала, измеряемого вторым каналом ($U = U_{cp}^{(1)} + U_{cp}^{(2)}/2$). Напряженность поля E_y вдоль выбранной линии симметрии определяется делением напряжения между двумя иглами (находящимися на данной линии симметрии) на расстояние между ними ($E_y = U_{cp}^{(2)}/2$). Расчет напряженности электрического поля осуществляется в последнем столбце таблицы.
11. Установите зонд на новую позицию по оси Y и продолжите регистрацию данных, повторяя действия, описанные в п. 9.
12. Выбрав соответствующие вкладки, выведите на экран графики зависимости потенциала и напряженности поля от координаты. Оцените степень однородности электрического поля и линейность изменения потенциала на оси межэлектродного промежутка. В последнем случае постройте прямую линию, наилучшим образом соответствующую точкам на графике. Для этого выберите в выпадающем списке аппроксимацию линейной зависимостью и нажмите кнопку .
13. Сравните усреднённое по экспериментальным точкам значение напряжённости поля с его теоретическим значением, которое при данной конфигурации электродов вычисляется по формуле:

$$E_{\text{теор}} = \frac{U_0}{d}.$$


14. Перенесите в отчет все полученные данные (таблицы и графики).

6.4.Регистрация эффекта экранирования электростатического поля внутри замкнутого проводника


1. Оставляя неизменной предыдущую конфигурацию электродов «плоскость-плоскость», поставьте в кювету замкнутый электрод, и повторите измерения в тех точках, где вами ранее были измерены потенциал и напряженность электрического поля. Для проведения измерений внутри замкнутого электрода зонд приподнимается на

- вертикальной направляющей, а затем снова опускается в раствор.
2. Сделайте и впишите в отчет выводы об изменениях в распределении поля и потенциала вне замкнутого электрода и внутри него.

6.5.Регистрация распределения потенциала и напряжённости поля вдоль характерного направления в системе плоскость-цилиндр

1. Установите в кювету малый цилиндрический электрод и удалите все записи из таблицы данных эксперимента . В таблице «конфигурация электродов» укажите новые геометрические параметры электродной системы: $d=90$ мм- расстояние между плоским и цилиндрическим электродом, $r_1=8$ мм- радиус цилиндрического электрода.
2. Получение и обработка данных проводится аналогично случаю плоских электродов, единственное отличие — это отсутствие аналитических зависимостей для распределения потенциала и напряженности электрического поля.

6.6.Регистрация распределения потенциала и напряжённости поля вдоль характерного направления в системе коаксиальных цилиндров

1. С помощью кнопки  вызовите на экран меню выбора работы и перейдите к третьему пункту данной работы «Распределение потенциала и напряжённости поля в системе коаксиальных электродов».
2. Установите в кювету кольцевой электрод большого диаметра, заменив им плоский электрод.
3. Заполните таблицу исходных данных, повторяя действия, описанные в пп. 5,6 из части 6.3.
4. Заполните таблицу «конфигурация электродов»: $R_1=8$ мм, $R_2=129$ мм, $Y_0=150$ мм (Y_0 -координата центра системы коаксиальных электродов). Положение зонда в системе коаксиальных электродов (текущее значение радиуса) рассчитывается по формуле $r=Y_0-Y$, где Y – координата зонда.
5. Произведите регистрацию данных, соблюдая порядок действий, описанный в пп. 8-9 из части 6.3.
6. Обработка результатов измерения распределения потенциала и электрического поля в коаксиальной геометрии электродов предполагает не только аппроксимацию полученных данных на основе метода наименьших квадратов, но и сравнение полученных результатов с теоретическими кривыми, полученными на основе геометрических

- размеров электродной системы (см. формулы 7, 8).
7. Перенесите в отчет все полученные данные (таблицы и графики).

7. Указания по технике безопасности

1. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством и принципом действия.
2. Не включайте лабораторную установку в сеть без проверки ее преподавателем или лаборантом.
3. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".
4. Запрещается вскрывать закрытые элементы установки, а также подвергать её ударным и силовым нагрузкам

8. Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте и запишите закон Кулона.
2. Дайте определение напряженности электростатического поля.
3. Дайте определение потенциала φ электростатического поля.
4. В каких единицах измеряется напряженность \vec{E} и потенциал φ в СИ?
5. Запишите зависимость, выражающую связь между напряженностью и потенциалом.
6. Дайте определение и запишите уравнение эквипотенциальной поверхности.
7. Объясните взаимное расположение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля.
8. Изложите порядок выполнения лабораторной работы.