

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Цель работы: научиться экспериментально измерять распределение потенциала в проводящей среде вокруг электродов различной формы зондовым методом.

Оборудование: установка для измерения распределения потенциала в электролитах, гальванометр, реостат, вольтметр.

1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое поле - особый вид материи, которая существует вокруг заряженных тел. Оно действует на другие заряженные тела, находящиеся в поле, с силой \vec{F} , пропорциональной величине заряда q данного тела. Отношение \vec{F}/q представляет собой силу, действующую на единичный положительный заряд. Эта величина характеризует само поле (его "интенсивность") и не зависит от величины заряда тела. Она называется напряженностью \vec{E} электрического поля. Напряженность - важнейшая характеристика электрического поля.

Напряженность является векторной величиной; по величине и направлению она совпадает с силой, действующей на точечный положительный, заряд величиной в 1 Кл, помещенный в данную точку поля:

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

Единицей измерения \vec{E} является В/м (вольт/метр). 1 В/м - это напряженность такого поля, которое действует с силой 1 Ньютон на точечный заряд 1 Кл.

Энергетической характеристикой электростатического поля является потенциал, который характеризует потенциальную энергию заряженного тела в данном электрическом поле. Потенциал численно равен потенциальной энергии, которой обладал бы точечный, положительный заряд в 1 Кл, помещенный в данную точку поля

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad (2)$$

Единица измерения потенциала - вольт. Это потенциал точки поля, в которой точечный заряд 1 Кл имеет потенциальную энергию 1 Дж.

Описать электрическое поле, созданное каким-либо заряженным телом (или группой тел) - значит задать значения потенциала или напряженности \vec{E} в каждой точке пространства вокруг тела (или группы тел). Весьма наглядно распределение

напряженности в пространстве можно изобразить с помощью силовых линий. Силовыми линиями электрического поля (линиями напряженности) называются линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности \vec{E} . Силовые линии проводятся с такой густотой, чтобы число линий, пронизывающих воображаемую площадку в 1 м, перпендикулярную полю, равнялось величине напряженности поля в данном месте. Примеры распределения силовых линий для простейших электрических полей приведены на рис. 1.

Распределение потенциала в пространстве вокруг заряженных тел можно графически изображать с помощью эквипотенциальных линий (или эквипотенциальных поверхностей). Это линии (или поверхности) одинакового потенциала. Поверхность (или линии), во всех точках которой потенциал одинаков, называется эквипотенциальной. Пользуясь эквипотенциальными линиями и поверхностями можно изображать электрические поля графически. Примеры эквипотенциальных линий для простых электрических полей приведены на рис. 2. Удобно проводить эквипотенциальные линии (и поверхности) таким образом, чтобы разность потенциалов для двух соседних эквипотенциальных линий была всюду одна и та же. Тогда по густоте эквипотенциальных линий можно судить о скорости нарастания потенциала с расстоянием.

Между характеристиками электрического поля напряженностью \vec{E} и потенциалом φ существует очевидная связь. Поскольку напряженность соответствует силе действия поля на заряд, а потенциал соответствует его потенциальной энергии, следовательно, между ними существует соотношение:

$$\vec{E} = - \text{grad } \varphi \quad (3)$$

Здесь
$$\text{grad } \varphi = \frac{d\varphi}{dx} + \frac{d\varphi}{dy} + \frac{d\varphi}{dz} .$$

В одномерном случае, когда потенциал меняется только вдоль оси X, формула (3) значительно упрощается:

$$\vec{E} = - \frac{d\varphi}{dx} \quad (3')$$

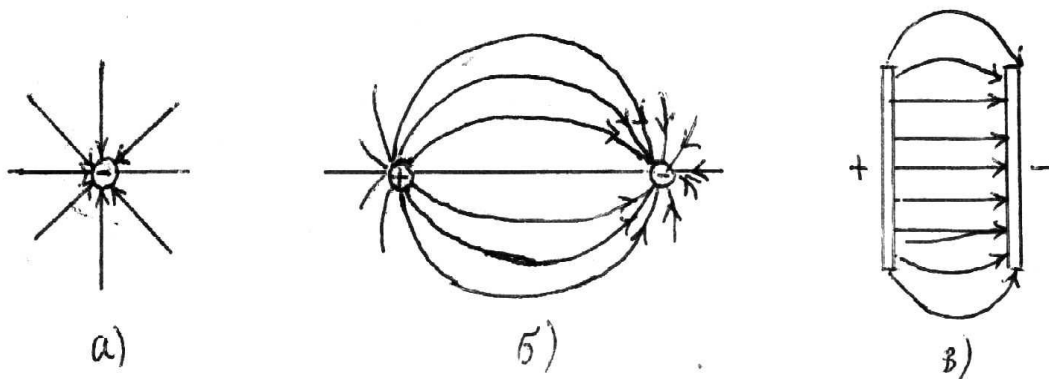


Рис. 1. Силовые линии электрического поля точечного заряда (а), двух

точечных зарядов (б) и между двумя заряженными плоскими пластинами (в).

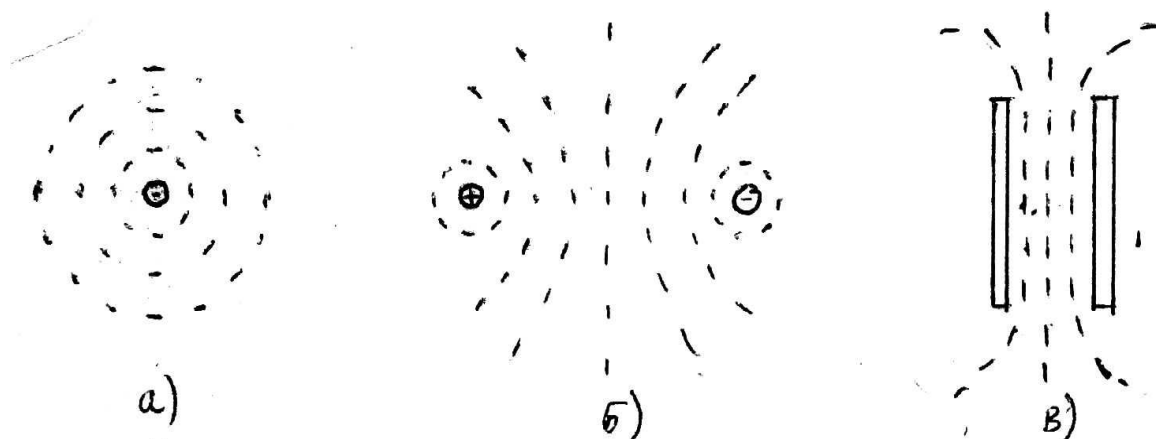


Рис. 2. Эквипотенциальные поверхности для поля одного точечного заряда (а), для двух точечных зарядов (б), параллельных заряженных пластин (в).

Пусть эквипотенциальная линия направлена вдоль оси OX . При перемещении по эквипотенциальной линии потенциал не изменяется, то есть

$\Delta\varphi = 0$, $d\varphi/dx = 0$ и, следовательно $\vec{E} = 0$. Это означает, что на эквипотенциальной поверхности или линии существует лишь вертикальная составляющая вектора \vec{E} . Значит, вектор \vec{E} всегда направлен по нормали к эквипотенциальной линии или поверхности. Следовательно, линии напряженности (силовые линии) в каждой точке перпендикулярны эквипотенциальным линиям (или поверхностям). Если эквипотенциальные линии проводятся так, что разность потенциалов между соседними линиями всегда равна 1 вольту, то густота эквипотенциальных линий будет пропорциональна напряженности. Чем гуще располагаются эквипотенциальные линии, тем быстрее изменяется потенциал при перемещении по нормали, следовательно, тем больше в данном месте $d\varphi/dx$, а значит и \vec{E} .

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

При конструировании электронных ламп, конденсаторов, электронных линз и других приборов часто требуется знать распределение потенциала электрического поля в пространстве между электродами сложной формы. Обычно это пространство представляет собой вакуум или диэлектрик. Аналитический расчет поля удается выполнить лишь при самых простых конфигурациях электродов. Сложные электростатические поля исследуются экспериментально.

Однако электрические измерения потенциалов в диэлектрических средах (и в вакууме) сильно затруднены вследствие их низкой проводимости, которая сильно

зависит от внешних условий (температуры, влажности и т. д.). Поэтому экспериментальные измерения выполняют в проводящих средах. Как показывают расчеты, распределение потенциала в пространстве сохраняется при замене диэлектрической среды на проводящую, если электропроводность среды не очень велика. При этом сохраняются также и граничные условия для потенциала и вектора напряженности на поверхности электродов.

На практике для экспериментального нахождения распределения потенциала электрических полей сложной формы используют в качестве среды жидкие электролиты. Измерения потенциалов производят с помощью зондов.

В электролитическую ванну помещают электроды, форма которых воспроизводит исследуемый прибор (натуру) в некотором масштабе (чаще увеличенном). Электроды располагают относительно друг друга так же, как они расположены в моделируемом приборе. На них подают потенциалы, равные натуральным или измененные в некотором соотношении. При этом между электродами образуется электрическое поле, воспроизводящее исследуемое по своему строению, но напряженности и потенциалы в нем отличаются от натуре на некоторый коэффициент (коэффициент масштабирования).

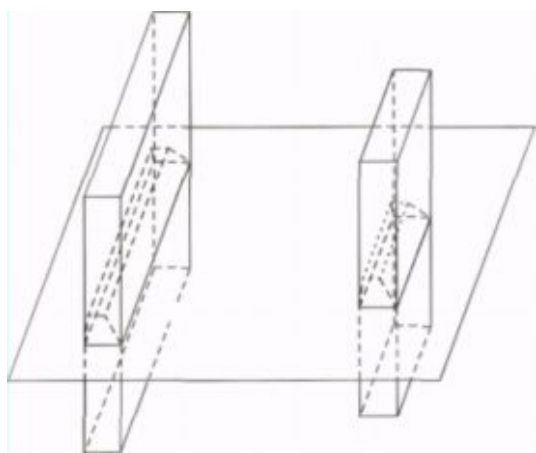
Граничные условия на поверхности жидкости и воздуха определяются тем, что электрический ток не может идти перпендикулярно этой поверхности, так как воздух является непроводящей средой. Следовательно, в жидкости установится такое распределение потенциала, при котором вектор \vec{E} не имеет составляющих, перпендикулярных поверхности. Поэтому в электролитической ванне можно без искажений моделировать только двумерные поля, не имеющие составляющих, перпендикулярных поверхности жидкости. Это же требование должно выполняться на дне и стенках ванны.

Обычно электростатическое поле исследуется путем определения потенциалов с помощью измерительных зондов. Зонд представляет собой тонкую металлическую проволоку, помещенную в выбранную точку поля. Потенциал такого зонда равен потенциалу исследуемой точки. Однако измерение этого потенциала должно выполняться прибором с очень высоким входным сопротивлением, чтобы избежать ошибок за счет протекания тока через зонд. Поэтому для измерений здесь используется либо высокоомный вольтметр (обычно электронный), либо специальный мост, использующий компенсационный метод для измерения разности потенциалов.

Главная экспериментальная трудность описанного метода заключается в том, что при измерениях на постоянном токе на электродах наблюдаются химические реакции (за счет явления электролиза). Это явление получило название "поляризации" электродов. В результате поляризации поверхность электродов окисляется, сопротивление электродов растет, что приводит к неконтролируемому изменению токов распределению потенциалов в электролите. Для устранения "поляризации" на электроды подают переменное напряжение и все измерения потенциалов выполняют приборами переменного тока.

Описание установки и методики измерений

Для моделирования электростатического поля удобно использовать аналогию, существующую между электростатическим полем, созданным заряженными телами данной формы в вакууме, и



электрическим полем постоянного тока, текущего по проводящей плёнке с однородной проводимостью. При этом расположение силовых линий электростатического поля оказывается аналогично расположению линий электрических токов.



То же утверждение справедливо для потенциалов. Распределение потенциалов поля в проводящей плёнке такое же, как в электростатическом поле в вакууме, если оно задано заряженными телами, сечение которых плоскостью плёнки совпадает со "следом", оставляемым моделью электрода на плёнке, а высота бесконечно велика. Например, при использовании моделей электродов, приведенных на рис. 1.2, на проводящей плёнке возникает такое же распределение



потенциалов, как в электростатическом поле в вакууме, созданном двумя бесконечно длинными плоскостями, перпендикулярными плоскости плёнки. На бумаге устанавливаются массивные модели электродов, так что обеспечивается хороший контакт между электродом и проводящей бумагой. Для исследования электростатического поля применяется установка (рис. 1.3), состоящая из лабораторного модуля, зонда, выносного

элемента, источника питания ИП и вольтметра. Выносной элемент представляет собой диэлектрическую панель, на которую помещают лист миллиметровой бумаги, поверх нее - лист копировальной бумаги, затем - лист электропроводящей бумаги, на которой устанавливаются электроды.

Электрическая схема лабораторной работы изображена на передней панели модуля (рис. 1.4). Напряжение от источника питания ИП с ЭДС E , подается на однополюсные розетки 1 и 2, к которым подключаются электроды, установленные на электропроводящей бумаге. К модулю также подключаются зонд (к однополюсной розетке 3) и вольтметр (к однополюсным розеткам 4 и 5). В качестве вольтметра используется мультиметр.

Потенциал зонда равен потенциалу той точки поверхности электропроводящей бумаги, которой он касается. Совокупность точек, для которых потенциал одинаков, и есть изображение эквипотенциали поля. Вольтметр измеряет разность потенциалов между одним из электродов и зондом (точкой на электропроводящей бумаге, которой касается зонд). Для построения эквипотенциалов необходимо найти 7-8 точек с одинаковым потенциалом. Нахождение точек осуществляется путем перемещения зонда по электропроводящей бумаге. Для построения модели электростатического поля необходимо определить местонахождение 6 - 7 эквипотенциалов.

В качестве источника питания в данной работе используется источник питания "Марс".

Порядок выполнения работы

1. Укрепить на предметном столике лист миллиметровой бумаги, на него положить копировальную бумагу а поверх нее лист электропроводящей бумаги.

2. Установить на электропроводящей бумаге электроды, моделирующие систему "плоскость - плоскость" или "длинный цилиндр над плоскостью".

3. Включить источник питания и установить по вольтметру на лицевой панели прибора напряжение по указанию преподавателя (9 - 12 В).

4. Снять картину электрического поля:

а) касаясь зондом электродов, определить потенциалы электродов и обвести контуры электродов. Контуры электродов определяют крайние эквипотенциали;

б) перемещая зонд по бумаге, найти и отметить точки, соответствующие данной эквипотенциали. Точки отмечают в момент, когда вольтметр показывает одинаковое значение разности потенциалов между данной точкой на электропроводящей бумаге и одним из электродов (первая серия (7-8 точек) - 1,5 В, вторая серия - 3,0 В, третья серия - 4,5 В и т.д.);

в) отключить лабораторную установку от сети;

г) снять миллиметровку с доски и по точкам начертить эквипотенциали. На каждой эквипотенциали отметить соответствующее ей значение потенциала.

Обработка результатов измерений

1. На картине поля начертить координатную ось x , проходящую через центры электродов.

2. В табл. 1.1 записать координаты и соответствующие им потенциалы точек поля. Построить график зависимости $\varphi=f(x)$.

Таблица 1.

№	1	2	...
φ , В			
x , см			

3. Построить картину силовых линий поля. Густота и направление силовых линий должны соответствовать расположению эквипотенциален.

4. По формуле (1.3) рассчитать средние значения напряжённости электрического поля в точках с координатами d_{cp} , расположенных примерно в середине каждой пары эквипотенциалей. Результаты занести в табл. 1.2.

Таблица 2.

№	* $_{cp}$	Φ , В	φ , ч, В	$\Delta\varphi$, = φ , - φ , .,	Ддг, см	$\langle E \rangle$, В/см
				В		

1						
2						

5. Построить график зависимости $\langle E_x \rangle(x)$ по данным табл. 1.2.

6. Рассчитать поверхностную плотность заряда на электродах, используя формулу (1.4).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте основной закон электростатики (закон Кулона)?
2. Что такое напряженность электрического поля?
3. Дайте определение эквипотенциальной линии.
4. Как располагаются силовые линии и эквипотенциальные поверхности относительно друг друга?
5. Объясните метод зондов при измерении потенциалов поля.
6. Какой вид имеет семейство эквипотенциальных линий для системы плоских и коаксиальных электродов?

Что называется напряжённостью электростатического поля?

7. Что называется разностью потенциалов, потенциалом электростатического поля?

8. Какова дифференциальная связь между вектором напряжённости электростатического поля и потенциалом?

9. Какова интегральная связь между разностью потенциалов и напряжённостью электростатического поля?

10. На чем основывается возможность моделирования электростатических полей?

11. Каковы особенности взаимного расположения эквипотенциалов и силовых линий электростатического поля?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. "Курс общей физики", т.2, М.: Наука, 1978 г.
2. "Руководство к лабораторным занятиям по физике" // под ред. Гольдина Л.Л., М.: Наука.- 1973 г.
3. Калашников С.Г. "Электричество", М.: Наука, 1985 г.

Состав работы:

- лабораторный модуль _____ 1 шт.
- источник питания типа "Марс" _____ 1 шт.
- микромультиметр типа "MAS-830B" _____ 1 шт.
- электроды _____ 3 шт.
- полка _____ 1 шт.
- Параметры работы:
- напряжение источника питания не более 10 В.