

# Работа 321

## Исследование эквипотенциальных поверхностей в электролитической ванне

---

---

### Решаемые задачи

- Научиться работать с мультиметром.
  - Научиться находить точки с равным потенциалом.
  - Приобрести навыки построения эквипотенциальных и силовых линий электростатического поля.
- 
- 

Электрическое поле можно описать, задав в каждой его точке вектор напряженности  $\mathbf{E}$ . Такое описание можно представить графически, с помощью *силовых линий* — линий, касательные к которым в каждой точке направлены также как и вектор  $\mathbf{E}$ .

Другим способом электрическое поле можно задать, определив в каждой его точке его энергетическую характеристику — потенциал  $\varphi$ . Объединяя точки, обладающие одинаковым потенциалом, можно получить поверхности, называемые *эквипотенциальными*. Форма этих поверхностей, так же как и форма силовых линий электрического поля, определяется конфигурацией и расположением электродов в пространстве, при этом эквипотенциальные поверхности всегда перпендикулярны силовым линиям, причем силовые линии направлены в сторону убывания потенциала.

Напряженность и потенциал связаны между собой соотношениями

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi = -\nabla\varphi = -\left(\mathbf{i}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \mathbf{j}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \mathbf{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) \quad (1)$$

и

$$\varphi = \int_r^{\infty} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r}. \quad (2)$$

Цель этой работы — исследовать картину эквипотенциальных линий для системы заряженных тел различной формы. Для этого используется метод моделирования электростатических полей с помощью электролитической ванны. Идея метода заключается в том, что изучаемая система электродов помещается в ванну со слабо проводящей жидкостью. К электродам прикладывают напряжение, поэтому в ванне течет слабый ток, и создается распределение потенциала, которое можно измерить.

Для электрического тока в произвольной проводящей среде можно записать уравнение непрерывности:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \text{или} \quad \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (3)$$

где  $j_x, j_y, j_z$  — компоненты вектора плотности тока,  $\rho$  — плотность заряда в рассматриваемой точке. Для постоянного тока все электрические величины не зависят от времени и  $\partial \rho / \partial t = 0$ . В этом случае

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

С другой стороны, в каждой точке проводящей среды можно записать закон Ома в дифференциальной форме:

$$\mathbf{j} = \lambda \mathbf{E} \quad (5)$$

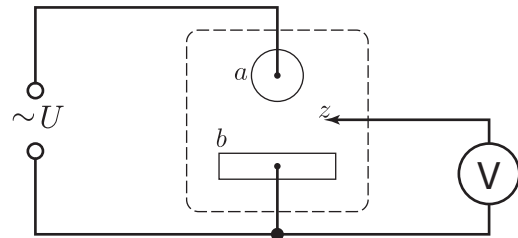
где  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля внутри проводника,  $\lambda = 1/\rho$  — удельная проводимость среды. Из уравнений (4) и (6) следует, что

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \quad \text{или} \quad \operatorname{div} \mathbf{E} = 0. \quad (6)$$

Таким образом, электрическое поле  $\mathbf{E}$  в проводящей среде удовлетворяет тому же уравнению, что и электростатическое поле  $\mathbf{E}_{\text{ст}}$  в вакууме. Для полного совпадения этих полей также необходимо, чтобы они были одинаковы на границе электродов. Электростатическое поле всегда перпендикулярно поверхности электрода (поскольку всем точкам электрода соответствует одинаковый потенциал). В проводящих средах такое условие будет соблюдаться, если удельная проводимость среды намного меньше проводимости материала электродов. В таком случае для электрического поля в проводящей среде  $\mathbf{E}$

и в вакууме  $\mathbf{E}_{\text{ст}}$  будут выполняться одинаковые граничные условия, и поскольку оба этих поля удовлетворяют одинаковому дифференциальному уравнению, можно считать что они совпадают. Измерив экспериментально картину распределения потенциала в слабо проводящей среде, можно получить картину распределения потенциала для электростатического поля с подобной формой электродов.

Как видно из вывода, полученный результат справедлив лишь, когда проводимость  $\lambda$  не зависит от координат. Однако, эта зависимость возникает благодаря поляризации электролита вблизи электродов (появление избытков заряда одного знака). Чтобы избежать изменения  $\lambda$  вследствие поляризации, необходимо на электроды накладывать переменное электрическое поле. При этом переменное электрическое поле должно удовлетворять условию квазистационарности.



Для проведения эксперимента в электролитическую ванну, заполненную водой, помещаются исследуемые электроды  $a$  и  $b$ . Чтобы устранить влияние электролиза на потенциалы электродов в работе используется переменное напряжение  $U$ . С помощью вольтметра измеряется разность потенциалов между одним из электродов ( $b$  на рисунке), потенциал которого принимается за 0 В, и иглой  $z$ , погруженной в воду. Перемещая иглу (зонд) по ванне, можно найти точки с выбранным потенциалом, и нанести их расположение на бумагу. Таким образом возможно смоделировать картину электрических полей в плоском конденсаторе, чашке Фарадея, электрическом диполе.

## Оборудование

Электролитическая ванна	1 шт.	54509
Набор из 6 зажимов-крокодилов	1 шт.	501861
Низковольтный источник питания	1 шт.	521231
Мультиметр LDanalog 20	1 шт.	531120
Вязальная игла	1 шт.	24124101
Пара кабелей 100 см, красный/синий	2 шт.	50146

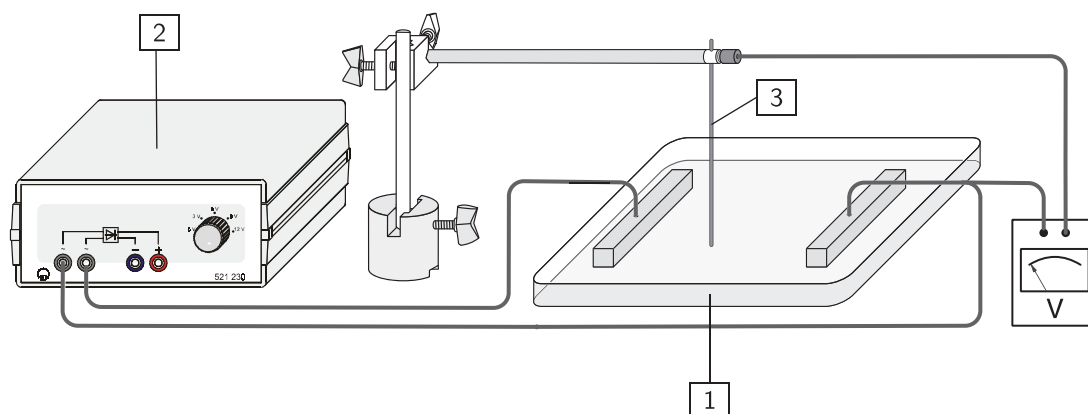


Рис.1. Экспериментальная установка для исследования эквипотенциальных поверхностей: 1) электролитическая ванна; 2) источник питания; 3) зонд.

## Порядок выполнения работы

### Исследование поля электродов разной конфигурации

- Установить в ванне одну из двух пар электродов, указанных преподавателем (некоторые варианты приведены на рис. 2).
- Взять два одинаковых листа миллиметровой бумаги и отметить на них положения исследуемых электродов.
- Один лист миллиметровой бумаги положить под электролитическую ванну и установить электроды.
- Налить в ванну тонкий (5 ... 10 мм) слой воды.
- Включить источник питания и установить напряжение 3 В.
- Установить иглу (зонд) возле одного из электродов и записать значение напряжения  $U$  мультиметра.
- Перемещая зонд найти точки с таким же значением напряжения и нанести их положение на втором листе миллиметровой бумаги. Полученные точки соединить плавной линией, возле кривой отметить значение потенциала.
- Смещая каждый раз зонд от первоначального положения примерно на 0,5 см повторять измерения, получая на каждом шаге новую эквипотенциальную кривую.
- Закончив измерения для первой пары электродов, заменить электроды на другую пару и повторить эксперимент.

### Исследование поля двух коаксиальных цилиндрических электродов

- Поместить в ванну соосно два цилиндрических электрода разного диаметра.
- Измерить зависимость потенциала от расстояния до оси цилиндров.

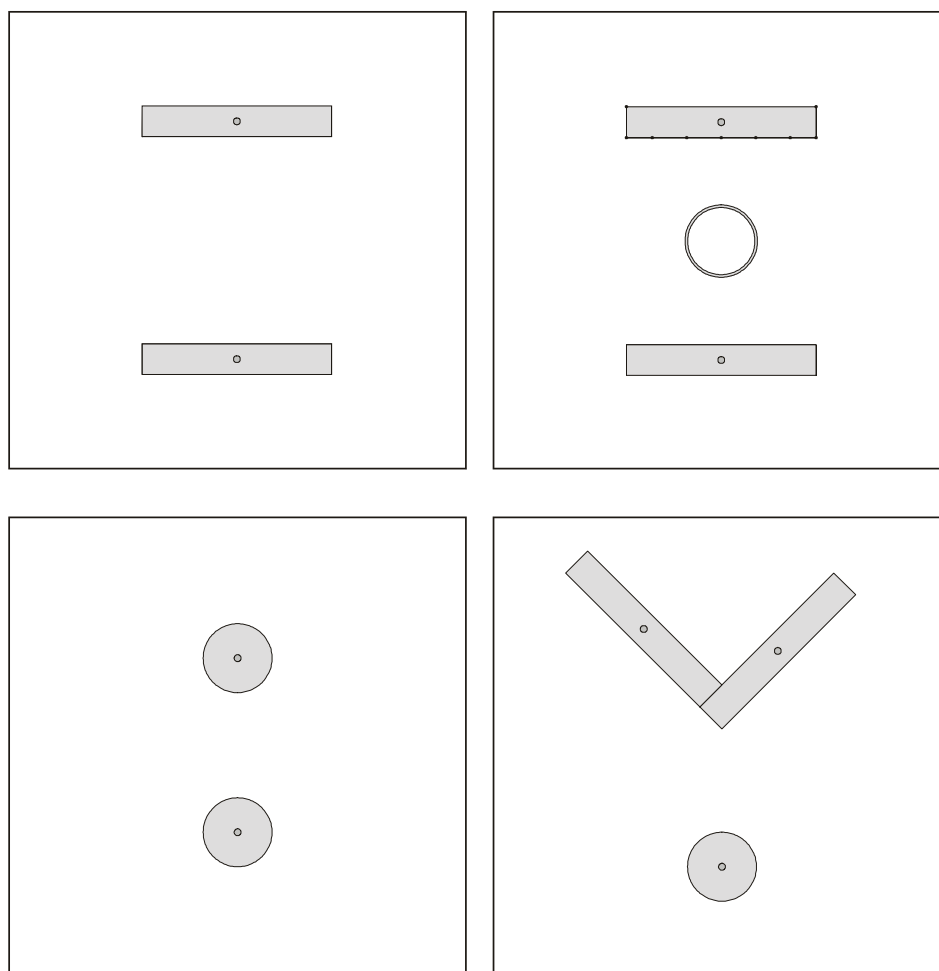


Рис.2. Варианты размещения электродов.

- Построить график зависимости потенциала  $\varphi$  от  $\ln r$ , где  $r$  — расстояние от оси цилиндров до точки поля, и сравнить полученный результат с теоретической зависимостью потенциала поля, создаваемого двумя бесконечно протяженными заряженными коаксиальными цилиндрами.

## Вопросы для подготовки

1. Электрическое поле в вакууме. Закон Кулона. Напряженность электрического поля.
2. Постоянное электрическое поле. Принцип суперпозиции для электрических полей.
3. Электростатическая теорема Остроградского-Гаусса.
4. Потенциальность электрического поля. Скалярный потенциал. Нормировка потенциала. Связь напряженности поля с потенциалом.
5. Эквипотенциальные поверхности и силовые линии электрического поля.
6. Вывод формулы зависимости потенциала  $\varphi$  от  $\ln r$ , где  $r$  — расстояние от оси цилиндров до точки между двумя бесконечно протяженными заряженными коаксиальными цилиндрами.

7. Необходимые условия для моделирования электростатического поля в электролитической ванне.