

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

**Цель работы:** найти и построить эквипотенциальные поверхности и силовые линии электрического поля между двумя электродами произвольной формы; определить напряженность и потенциал в некоторых точках поля.

**Приборы и принадлежности:** плоская ванная из пластмассы с токопроводящей жидкостью (водой), генератор звуковых частот ЗГ, вольтметр V.

## Краткая теория

Всякий электрический заряд окружен электрическим полем. Электрическое поле – вид материи, посредством которой осуществляется взаимодействие электрических зарядов. Если электрическое поле рассматривается в системе отсчета, неподвижной относительно заряда, создающего поле, оно является электростатическим.

Основными характеристиками электростатического поля являются напряженность  $\vec{E}$  и потенциал  $\varphi$  (силовая и энергетическая характеристики поля).

Напряженностью данной точки электрического поля называется векторная величина, численно равная силе  $\vec{F}$ , действующей со стороны поля на единичный положительный заряд, помещенный в рассматриваемую точку поля, и направленная в сторону действия этой силы:

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

Потенциалом электрического поля в данной точке называется скалярная величина, численно равная отношению потенциальной энергии  $\Pi$  заряда, помещенного в данную точку поля, к величине этого заряда:

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

Напряженность и потенциал связаны между собой уравнением:

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

где «grad» – это векторный оператор (градиент);  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орты осей  $x, y$  и  $z$ :

$$grad\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}$$

Знак «минус» в уравнении (3) указывает, что вектор напряженности  $\vec{E}$  направлен в сторону убывания потенциала, т.е. противоположно  $grad\varphi$ .

Графически электростатические поля изображают силовыми линиями и эквипотенциальными поверхностями.

**Силовые линии** – это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $\vec{E}$ , а густота силовых линий пропорциональна величине напряженности поля. На рис.1 показаны силовые линии для системы двух точечных зарядов: а) одного знака; б) противоположных знаков

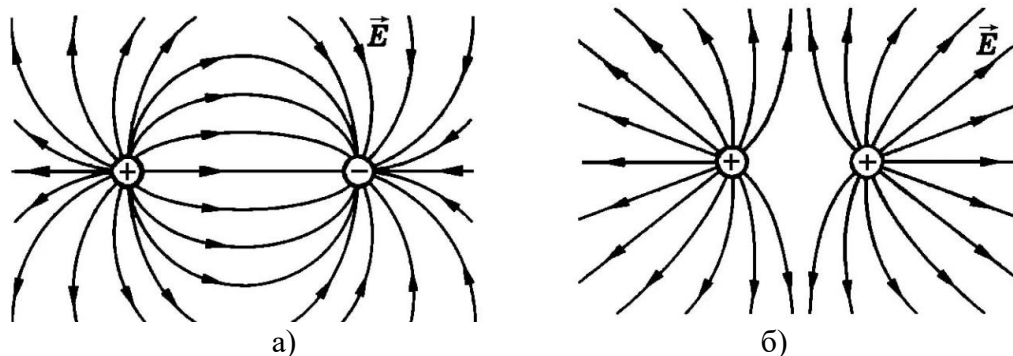


Рисунок 1. Силовые линии

**Эквипотенциальные поверхности** представляют собой геометрическое место точек равного потенциала. На рис.2 эквипотенциальные поверхности показаны штриховой линией: а) для точечного положительного заряда; б) для системы двух точечных зарядов.

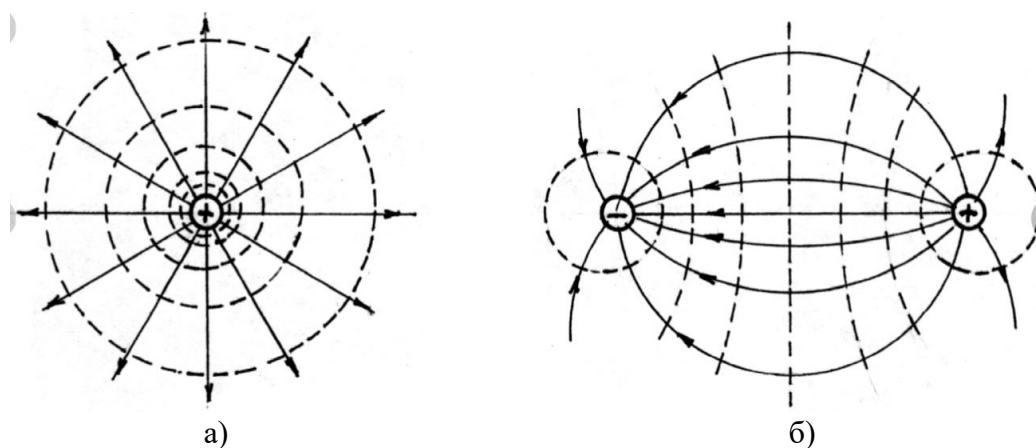


Рисунок 2. Эквипотенциальные поверхности

Вдоль эквипотенциальной поверхности работа сил электростатического поля равна нулю. Поэтому в точках пересечения эквипотенциальных поверхностей и силовых линий (см рис. 2) они расположены друг относительно друга под углом  $90^0$  (взаимно перпендикулярны!).

Форма силовых линий и эквипотенциальных поверхностей зависят от формы электродов и при построении на плоскости приобретают разнообразные по форме кривые.

Обычно при исследовании электростатических полей вначале изображают не силовые линии поля, а эквипотенциальные поверхности, что гораздо проще. Достаточно найти положение эквипотенциальных поверхностей, а затем, зная, что силовые линии поля перпендикулярны этим поверхностям, построить силовые линии и получить графическое изображение электростатического поля.

### Описание установки и метода измерений

В ванночку из пластмассы, заполненной слабо проводящей жидкостью (водой), помещают два металлических электрода произвольной формы. От звукового генератора (ЗГ) на электроды подают переменное напряжение частотой 1000 Гц. Между электродами возникает переменное электрическое поле, и в воде появляется слабый переменный ток, идущий от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом.

Для измерения потенциалов в разных точках проводящей среды берут два небольших проводника (зонда) в виде коротких металлических стержней, присоединенных к зажимам вольтметра. Один зонд заземляют или подсоединяют к любому электроду в ванне. Другой зонд помещают в разные точки проводящей среды находят последовательно координаты точек одинакового потенциала для построения эквипотенциальной линии. Перемещая зонд, аналогичным способом находят координаты точек следующей эквипотенциальной линии с другим значением потенциала т.д. Распределение эквипотенциальных линий в ванне будет зависеть от формы и взаимного расположения электродов.

Для выполнения работы необходимо собрать схему согласно рис.1 и подготовить к работе звуковой генератор ЗГ и вольтметр V.

Подготовка ЗГ:

- переключатель звуковых частот «F» установить в положение № 4 и при помощи ручки плавной регулировки частоты подобрать частоту  $\sim 1000$  Гц;
- переключатель напряжения «U» установить в положение «max».

Подготовка вольтметра V:

- установить предел измерения 200 В (при этом положении переключателя происходит округление значений потенциала до десятых долей вольта);
- переключатель режимов работы вольтметра установить в положение  $\sim$  напряжение.

Включить в сеть ЗГ и V. Коснуться зондом незаземленного электрода Э2 (см. рис.3) и получить на индикаторе V значение максимального напряжения.

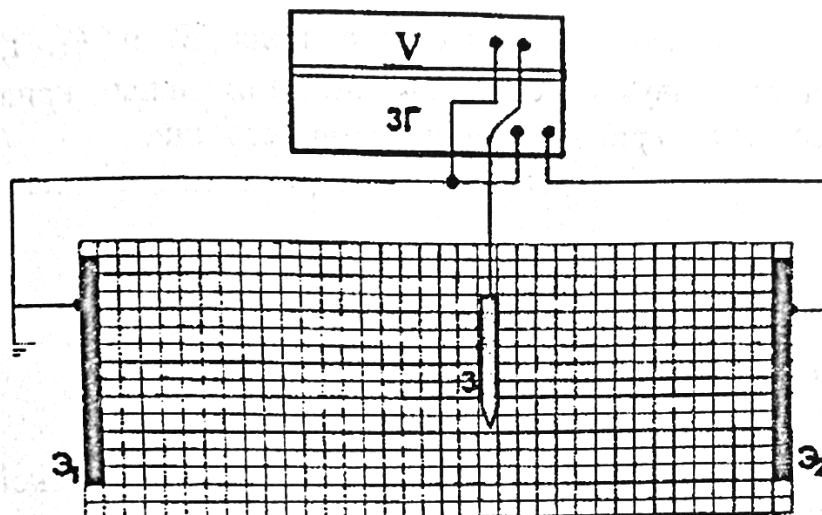


Рисунок 3. Установка для исследования электростатических полей

**Порядок выполнения экспериментального задания**

1. Расчертить на тетрадном листе сетку. Масштаб сетки 1x1 см. Отметить положение плоских электродов (см. рис. 4). Ввести систему координат XOY.

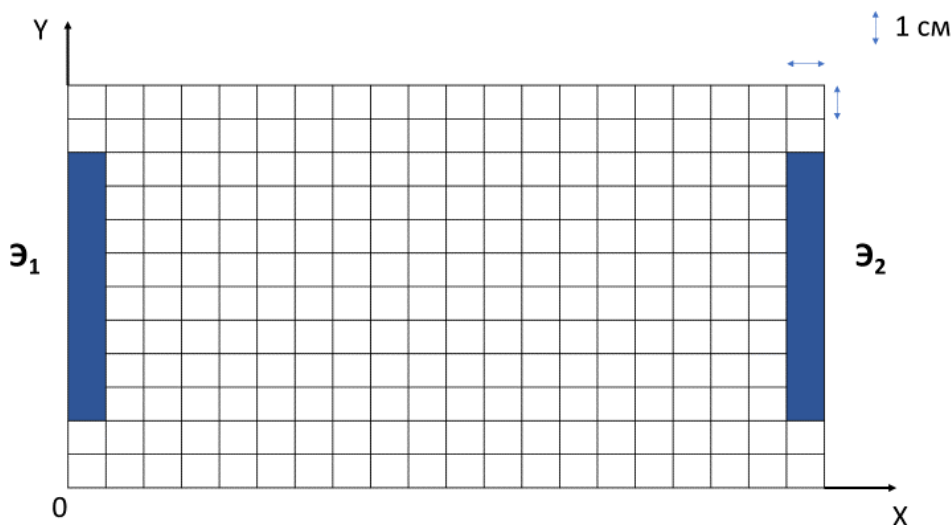


Рисунок 4. Масштабная сетка

2. Заготовить таблицу для записи результатов измерений.

Потенциал	Поверхность	Координаты				
		X, см				
$\varphi_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 1	X, см				
		Y, см				
$\varphi_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 2	X, см				
		Y, см				
$\varphi_3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 3	X, см				
		Y, см				
$\varphi_4 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 4	X, см				
		Y, см				
$\varphi_5 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 5	X, см				
		Y, см				

3. Поместить зонд 3 (см. рис. 3) между электродами вблизи одного из них (зонд измерения держать вертикально). С помощью вольтметра найти точки (не менее пяти), имеющие одинаковый потенциал. Перенести координаты найденных точек на масштабную сетку и соединить их плавной линией, указывая потенциал, которому соответствуют эти точки.

4. Перемещая зонд к другому электроду, получить координаты еще 5 эквипотенциальных поверхностей. Все координаты занести в таблицу результатов измерений!

5. На листе с масштабной сеткой отметить точки, соответствующие эквипотенциальным поверхностям разных потенциалов (см. рис. 5). Желательно при нанесении точек применять разные способы обозначения точек или цветные ручки (карандаши).

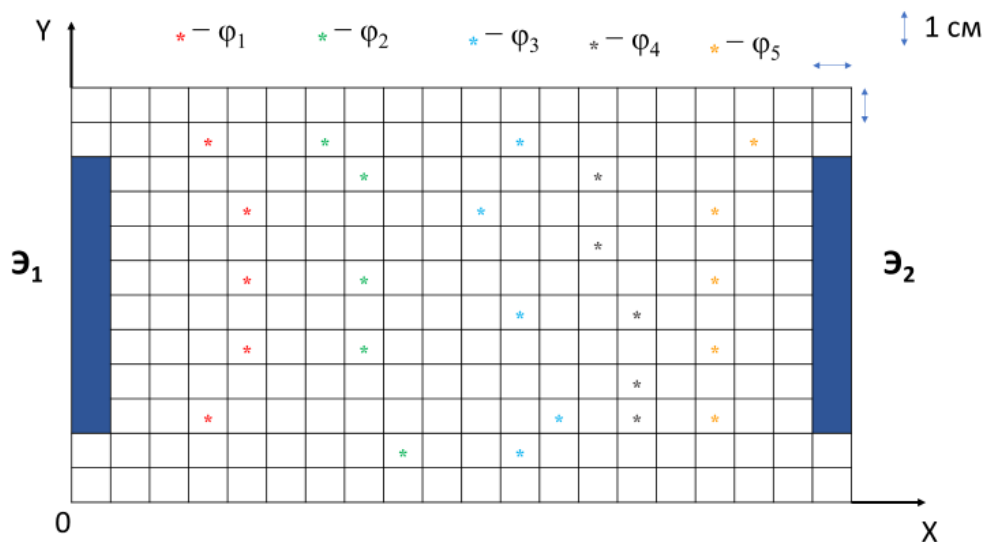


Рисунок 5. Нанесение экспериментальных точек

6. Построить эквипотенциальные поверхности. Для этого плавно соединить точки, соответствующие определенному потенциалу. На масштабной сетке подписать каждую эквипотенциальную поверхность значение потенциала (см. рис. 6).

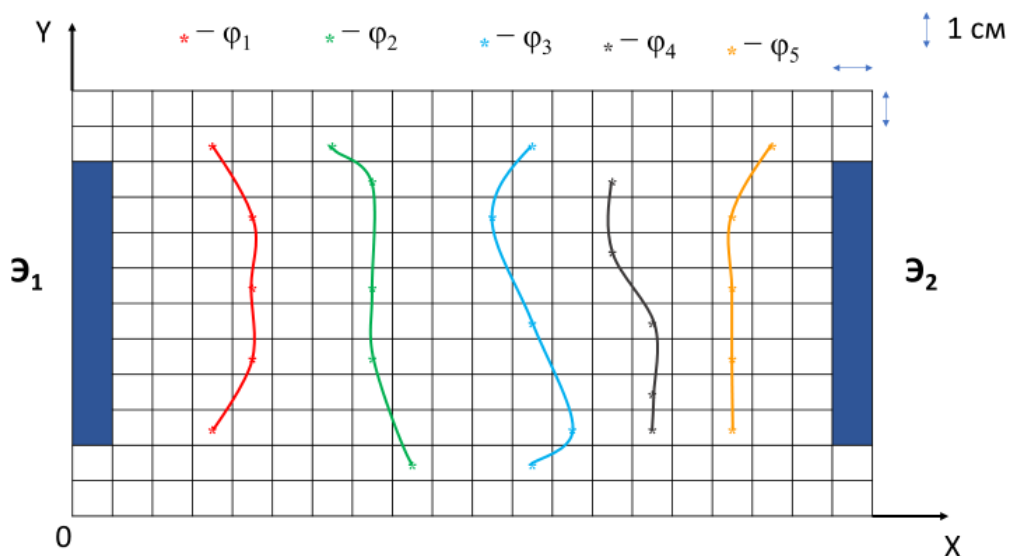


Рисунок 6. Построение экспериментальных эквипотенциальных поверхностей

7. Выбрать произвольно три точки на координатной сетке, для которых будет рассчитаны напряженности электростатического поля (см. рис.7). Обозначить эти точки: А, В, С.

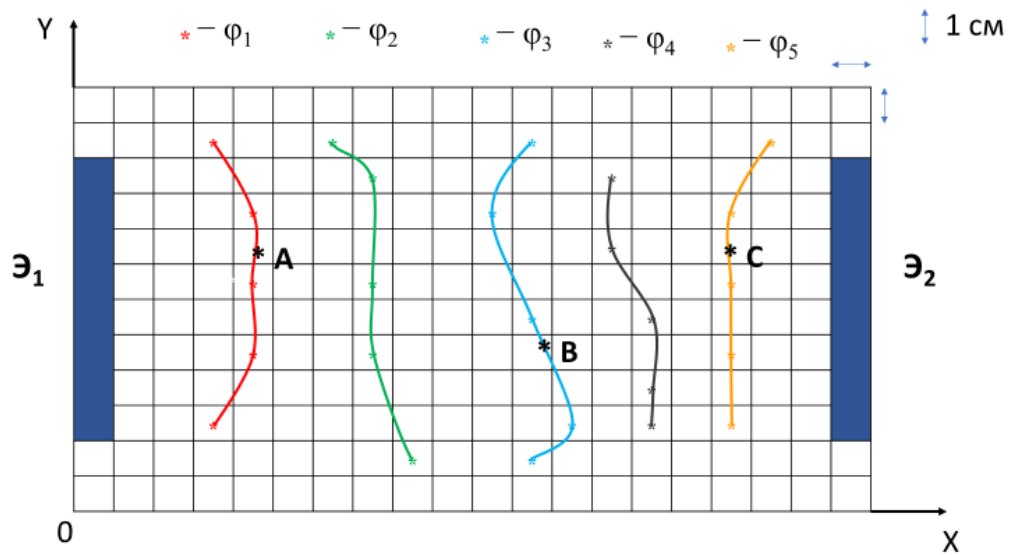


Рисунок 7. Выбор точек А, В, С

8. Вычисление числового значения напряженности электростатического поля.  
 Напряженность электростатического поля для плоских электродов согласно уравнению (3) может быть вычислена по следующей формуле:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} \quad (4)$$

где

разность потенциалов определяют как разность между ближайшими эквипотенциальными поверхностями

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_k;$$

разность координат  $\Delta x$  определяют по координатной сетке как расстояние между эквипотенциальными поверхностями.

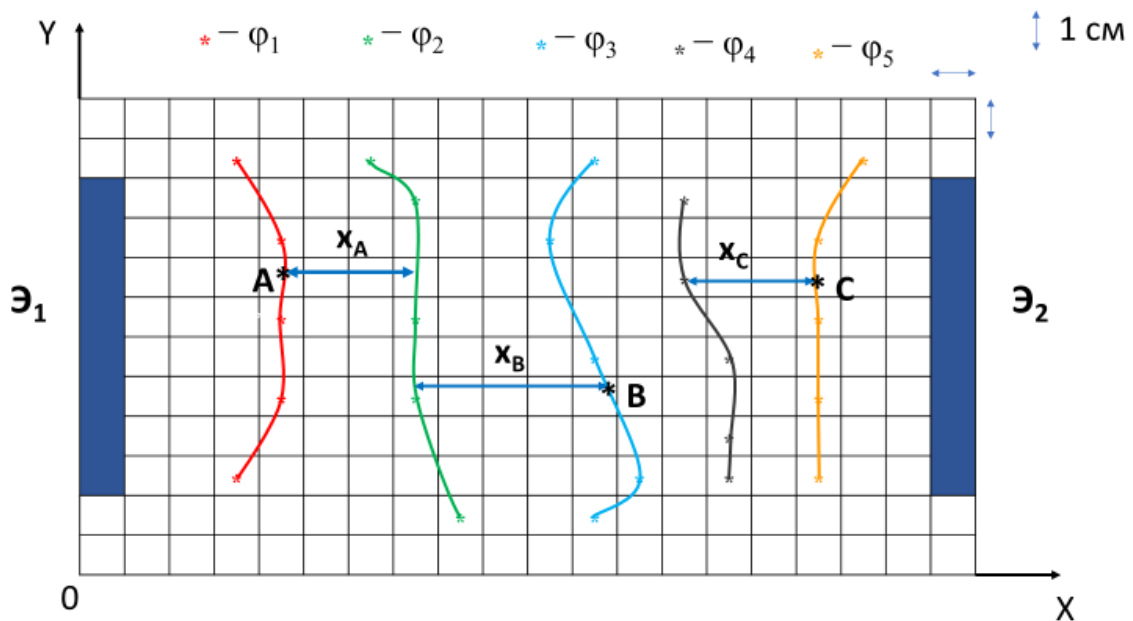


Рисунок 8. Дополнительные построения для вычисления напряженности поля

**Пример вычисления напряженности поля в точке В.**

Найти разность потенциалов (по модулю):  $|\Delta\varphi| = |\varphi_3 - \varphi_2|$ .

Измерить расстояние  $x_B$  по координатной сетке в см. При вычислении сантиметры надо перевести в метры. В формуле появится дополнительный множитель  $10^{-2}$ .

Например, известны следующие значения:  $\varphi_2 = 7 \text{ В}$ ;  $\varphi_3 = 5 \text{ В}$ ;  $x_B = 2,5 \text{ см}$ .

Вычисляем напряженность электростатического поля по формуле (4):

$$E_B = \frac{|\varphi_3 - \varphi_2|}{\Delta x \cdot 10^{-2}} = \frac{|5 - 7|}{2,5 \cdot 10^{-2}} = 800 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

9. Вычислить напряженности электростатического поля по формуле (4) в других точках. Определить среднее значение напряженности поля, как среднее арифметическое:

$$\langle E \rangle = \frac{E_A + E_B + E_C}{3}$$

#### 10. Построение силовой линии электростатического поля.

10.1. Исходя из уравнение (3) можно утверждать, что силовая линия направлена в сторону убывающего потенциала. Для этого, по координатной сетке с эквипотенциальными поверхностями определить направление, соответствующее убывающему потенциалу. Так как в лабораторной работе использовались плоские электроды, то направление силовой линии перпендикулярно эквипотенциальной поверхности. Указать для выбранных точек А, В и С направление силовых линий.

11. Сформулировать общие выводы по лабораторной работе. При формулировании вывода по лабораторной работе ответить на следующие вопросы.

11.1. Изменится ли значение напряженности электростатического поля, если вместо воды взять другую токопроводящую жидкость?

11.2. Влияет ли форма электродов на конфигурацию силовых линий и эквипотенциальных поверхностей электростатического поля?

#### Контрольные вопросы

1. Сформулировать физический смысл напряженности электростатического поля.
2. Сформулировать физический смысл потенциала электростатического поля.
3. Как математически связаны между собой напряженность и потенциал электростатического поля? Что такое градиент?
4. Как графически изображают электростатическое поле на плоскости?

**Экспериментальные результаты для студентов обучающихся на дистанционной форме**

Выберите только один вариант экспериментальных данных

Вариант № 1

Потенциал	Поверхность	Координаты					
		X, см					
$\varphi_1 = 3 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 1	X, см	3	4	4	4	3
		Y, см	2	4	6	8	10
$\varphi_2 = 3,5 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 2	X, см	8	7	7	7	6
		Y, см	1	4	6	9	10
$\varphi_3 = 4 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 3	X, см	11	12	11	10	11
		Y, см	1	2	5	8	10
$\varphi_4 = 4,5 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 4	X, см	14	14	14	13	13
		Y, см	2	3	5	7	9
$\varphi_5 = 5 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 5	X, см	16	16	16	16	17
		Y, см	2	4	6	8	10

Вариант № 2

Потенциал	Поверхность	Координаты					
		X, см					
$\varphi_1 = 2,8 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 1	X, см	4	5	4	6	4
		Y, см	3	5	6	9	11
$\varphi_2 = 2,4 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 2	X, см	7	8	7	8	7
		Y, см	2	3	5	8	11
$\varphi_3 = 2,0 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 3	X, см	10	12	11	11	13
		Y, см	3	5	6	9	11
$\varphi_4 = 1,6 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 4	X, см	12	13	13	12	14
		Y, см	3	4	6	7	10
$\varphi_5 = 1,2 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 5	X, см	15	16	15	16	17
		Y, см	3	4	7	8	12

Вариант № 3

Потенциал	Поверхность	Координаты					
		X, см					
$\varphi_1 = 4,25 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 1	X, см	4	5	5	6	4
		Y, см	2	4	6	10	11
$\varphi_2 = 4,75 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 2	X, см	7	9	7	9	8
		Y, см	3	4	5	9	12
$\varphi_3 = 5,00 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 3	X, см	9	11	12	10	12
		Y, см	3	4	7	9	10
$\varphi_4 = 5,25 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 4	X, см	11	12	13	12	13
		Y, см	3	4	7	8	11
$\varphi_5 = 5,50 \text{ В}$	Эквипотенциальная поверхность № 5	X, см	14	16	15	15	17
		Y, см	2	4	6	9	13