

---

Группа ЭМ СУиР 2.1.1

К работе допущен \_\_\_\_\_

Студенты Румянцев А. А., Овчинников  
П. А., Чебаненко Д. А.

Работа выполнена \_\_\_\_\_

Преподаватель Боярский К. К.

Отчет принят \_\_\_\_\_

## **Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе №3.01**

---

Изучение электростатического поля методом моделирования

---

## Цель работы

Построение сечений эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля на основе экспериментального моделирования распределения потенциала в слабопроводящей среде

## Задачи

1. Определить потенциал в исследуемых точках поля
2. Построить картины силовых линий и эквипотенциальных поверхностей исследуемого электростатического поля
3. Рассчитать величину напряженности в центре электролитической ванны и в окрестности одного из электродов
4. Описать расположение областей с минимальной и максимальной напряженностью и оценить соответствующие значения
5. Построить график зависимости потенциала от координаты для  $Y = 10$  см

## Экспериментальная установка

1. Электролитическая ванна
2. Генератор Напряжения
3. Вольтметр
4. Проводящее кольцо
5. Измерительный зонд
6. Металлические электроды

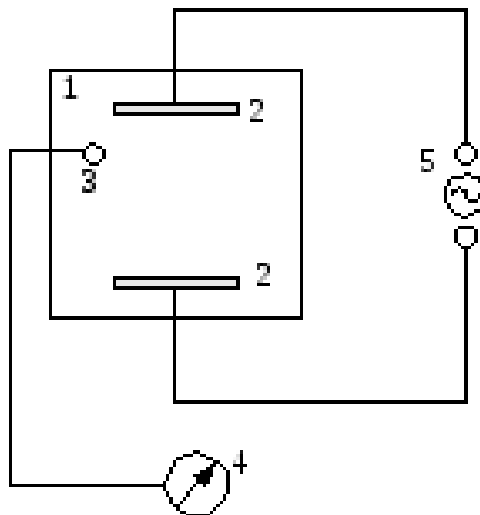
## Метод экспериментального исследования

Многократные измерения

## Измерительные приборы

№ п/п	Наименование	Тип прибора	Используемый диапазон	Погрешность прибора
1	Вольтметр	Электроизмерительный	0–14 В	0,1 В

## Схема установки



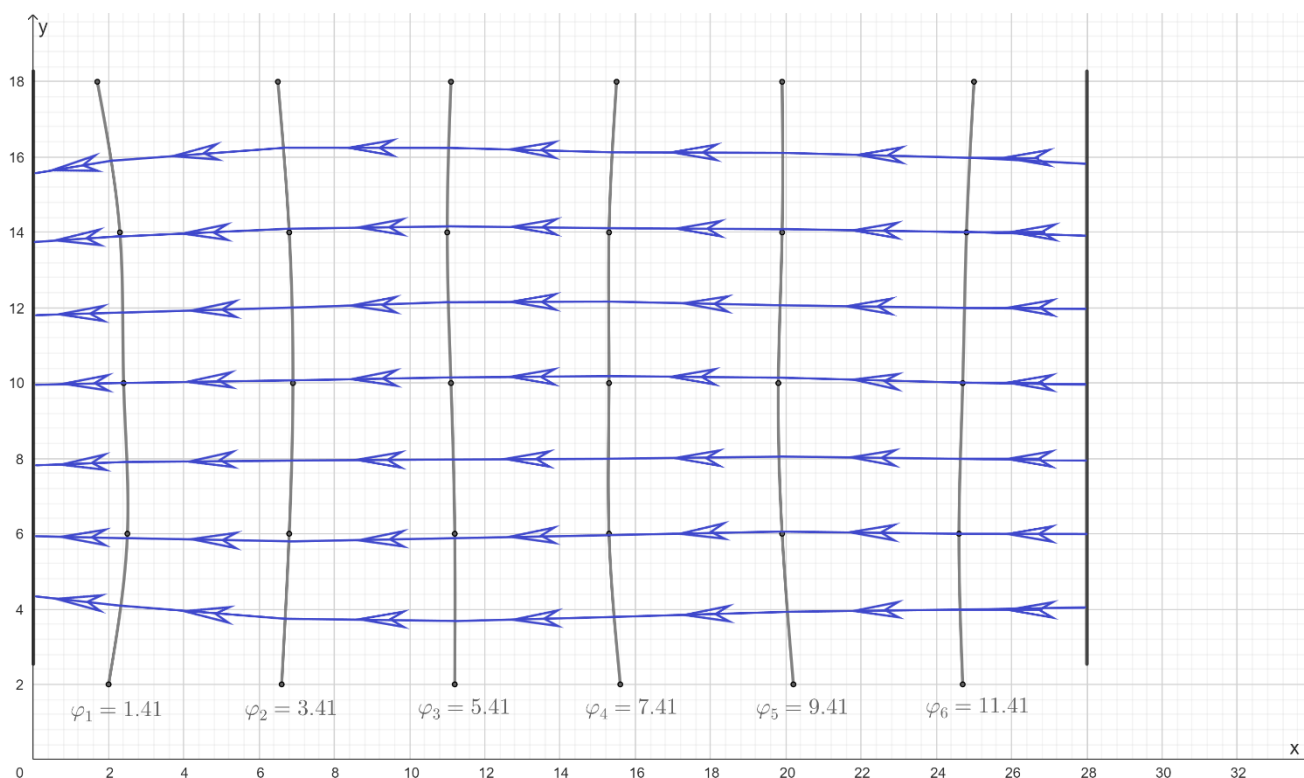
1 – электролитическая ванна, 2 – плоские металлические электроды, 3 – зонд, 4 – индикатор, 5 – источник тока

## Результаты прямых измерений и их обработки

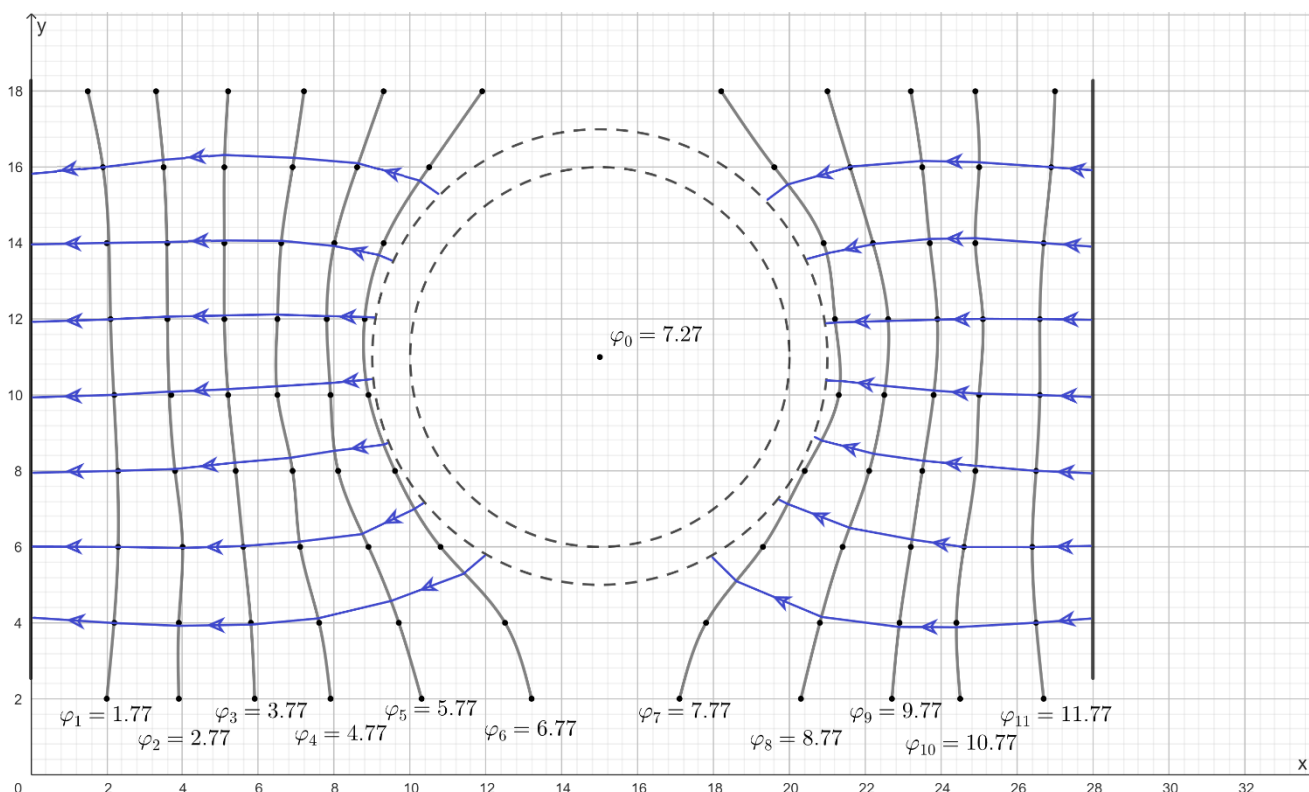
Мы провели измерения и по их результатам построили графики эквипотенциальных линий для случая без металлического проводника (кольца) (график 1) и с ним (график 2).

Также на графиках мы построили силовые линии – они всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям и направлены в сторону убывания потенциала. В случае данного исследования, в первом измерении без проводника *силовые линии непрерывно движутся от электрода с положительным зарядом к электроду с отрицательным зарядом*. Во втором измерении вследствие присутствия проводящего кольца *силовые линии прерываются на контуре проводника и возобновляются после него*.

**График 1 – эквипотенциальные (вертикальные) и силовые (горизонтальные) линии плоского конденсатора**



**График 2 – эквипотенциальные (вертикальные) и силовые (горизонтальные) линии для конфигурации поля при наличии проводящего кольца**



## Расчет результатов косвенных измерений

Оценим **поверхностную плотность электрического заряда на электродах** для модели **плоского конденсатора** по формуле  $\sigma' \cong -\varepsilon_0 \frac{\Delta\varphi}{\Delta l_n}$ , где  $\Delta\varphi$  – изменение потенциала при смещении на малое расстояние  $\Delta l_n$  по нормали к поверхности проводника,  $\varepsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$  – электрическая постоянная:

Для вычисления возьмем  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , тогда поверхностная плотность электрического заряда на электродах вычисляется как  $\sigma' \cong -8,85 \cdot 10^{-12} \frac{1,41-3,41}{\frac{11,5}{5} \cdot \frac{2}{100}} = 384,78 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ , где  $\frac{11,5}{5}$  – количество клеток между точками потенциалами, поделенное на размер одной клетки,  $\frac{2}{100}$  – 2 сантиметра в метрах.

Для модели **плоского конденсатора** по формуле  $\langle E_{ij} \rangle \cong \frac{\varphi_i - \varphi_j}{l_{ij}}$ , где  $\varphi_i - \varphi_j$  – разность потенциалов двух точек, лежащих на одной силовой линии,  $l_{ij}$  – длина участка силовой линии между точками, определим **среднюю напряженность** в:

### 1. Центре электролитической ванны:

Центр электролитической ванны находится между потенциалами  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$ , тогда напряженность в центре вычисляется как  $\langle E_{34} \rangle = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{l_{34}} = \frac{5,41-7,41}{\frac{11}{5} \cdot \frac{2}{100}} = -45,45 \frac{\text{В}}{\text{м}}$

## 2. В окрестности одного из электродов:

Возьмем из окрестности левого электрода потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , тогда напряженность вычисляется как  $\langle E_{12} \rangle = \frac{1,41 - 3,41}{\frac{11,5}{5} \cdot \frac{2}{100}} = -43,48 \frac{\text{В}}{\text{м}}$

Аналогичным методом проведем вычисления **напряженности** на каждом отрезке для конфигурации поля при наличии **проводящего кольца**, чтобы найти области с минимальной и максимальной напряженностью. Результаты запишем в таблицу 1.

**Таблица 1. Напряженность на отрезках**

Отрезки→ Y, см↓	Результаты вычислений, $\frac{\text{В}}{\text{см}}$								
	1,77–2,77	2,77–3,77	3,77–4,77	4,77–5,77	5,77–6,77	7,77–8,77	8,77–9,77	9,77–10,77	10,77–11,77
2	-0,53	-0,50	-0,50	-0,42	-0,35	-0,31	-0,42	-0,63	-0,42
4	-0,60	-0,56	-0,49	-0,50	-0,36	-0,33	-0,49	-0,68	-0,50
6	-0,63	-0,63	-0,66	-0,63	-0,50	-0,38	-0,60	-0,78	-0,56
8	-0,78	-0,69	-0,71	-0,83	-0,63	-0,63	-0,63	-0,83	-0,63
10	-0,74	-0,64	-0,83	-0,68	-1,19	-0,81	-0,83	-0,96	-0,63
12	-0,63	-0,64	-0,81	-0,78	-1,00	-0,78	-0,76	-0,92	-0,69
14	-0,62	-0,63	-0,71	-0,72	-0,83	-0,78	-0,76	-0,83	-0,51
16	-0,60	-0,61	-0,62	-0,56	-0,56	-0,50	-0,52	-0,69	-0,54
18	-0,48	-0,50	-0,51	-0,36	-0,36	-0,37	-0,49	-0,60	-0,45

На отрезках, находящихся ближе к проводящему кольцу, напряженность выше (линии расположены ближе друг к другу). Это можно объяснить тем, что в формуле длина отрезка обратно пропорциональна напряженности

Исходя из результатов вычислений напряженности можно сделать вывод, что **области с наименьшей напряженностью находятся рядом с электродами** (см. отрезки 1,77–2,77 и 10,77–11,77), а **области с наибольшей напряженностью находятся рядом с проводящим кольцом** (см. отрезки 5,77–6,77 и 7,77–8,77)

### Расчет погрешностей измерений

Оценим величину погрешности вычислений напряженности в модели плоского конденсатора. Найдем погрешность измерения потенциала и измерения длины отрезка между потенциалами:

$$\frac{\partial E}{\partial \varphi_1} = \frac{1 - \varphi_2}{l_{12}} \quad \frac{\partial E}{\partial \varphi_2} = \frac{\varphi_1 - 1}{l_{12}} \quad \frac{\partial E}{\partial \varphi_1} = -\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l_{12}^2}$$

Тогда погрешность напряженности можно найти, сложив все погрешности выше следующим образом:

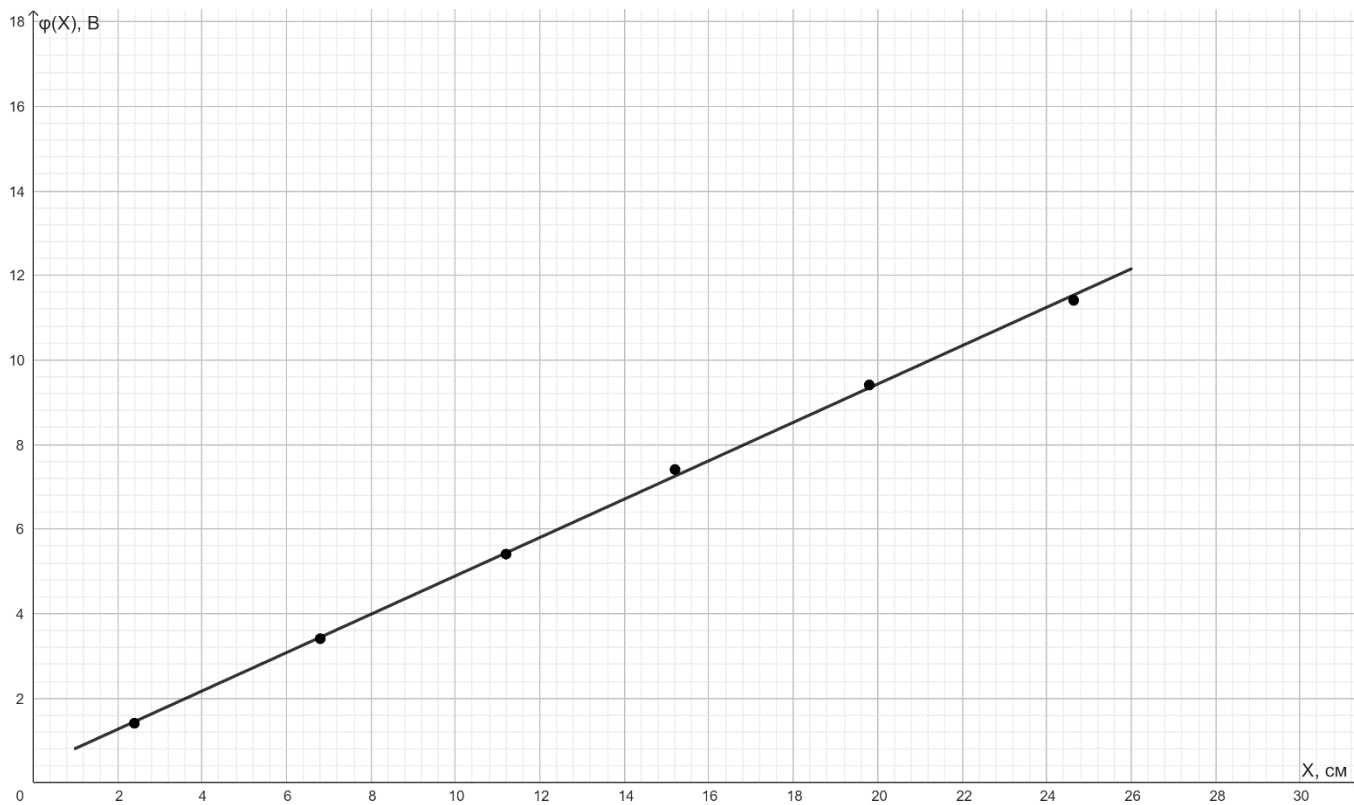
$$\Delta E = \sqrt{\frac{1 - \varphi_2}{l_{12}} \Delta \varphi + \frac{\varphi_1 - 1}{l_{12}} \Delta \varphi - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l_{12}^2} \Delta l_{12}} = \sqrt{\Delta \varphi \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l_{12}} - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l_{12}^2} \Delta l_{12}}$$

Где  $\Delta \varphi = 0,1 \text{ В}$  – погрешность измерения потенциала вольтметром,  $\Delta l_{12}$  – погрешность измерения длины отрезка между потенциалами линейкой, возьмем  $0,001 \text{ м}$ , тогда:

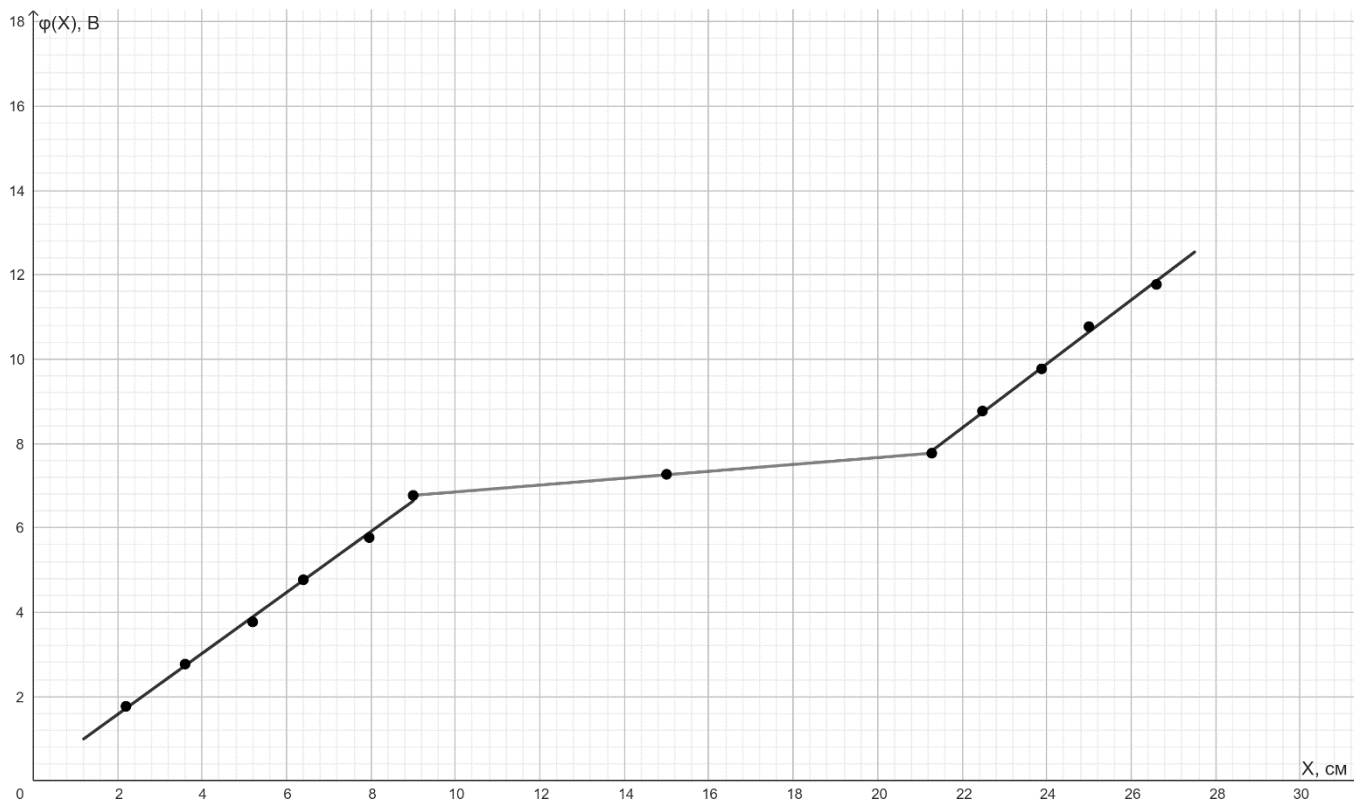
$$\Delta E = \sqrt{0,1 \cdot |-43,48| - 0,001 \cdot |-945,18|} = \sqrt{3,40} = 1,84 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

## Графики

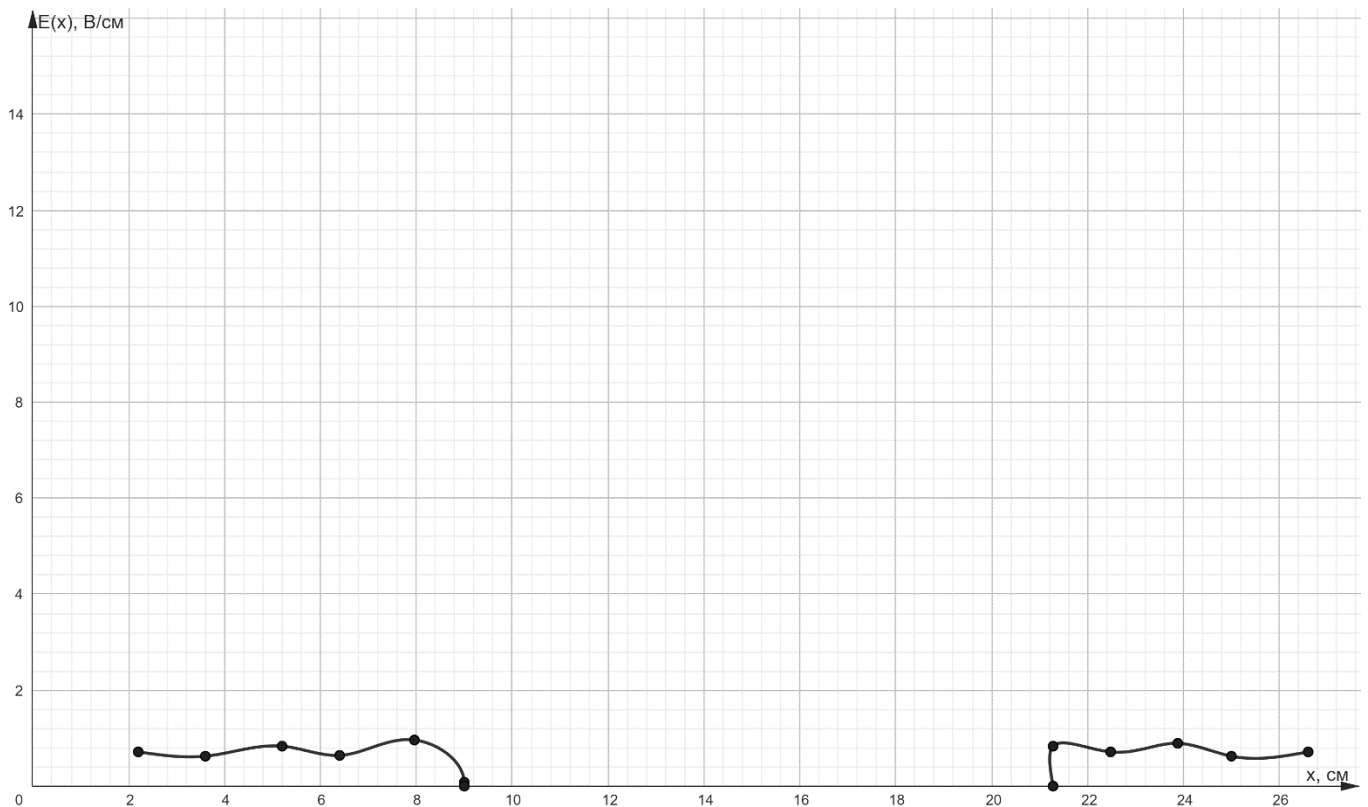
1. График  $\varphi(x)$  зависимости потенциала от координаты для горизонтали  $Y = 10$  см для модели плоского конденсатора



2. График  $\varphi(x)$  зависимости потенциала от координаты для горизонтали  $Y = 10$  см для конфигурации поля с проводящим кольцом



### 3. График $E(x)$ зависимости напряженности от координаты для конфигурации поля с проводящим кольцом



#### Окончательные результаты работы

Для модели плоского конденсатора средняя напряженность:

1. В центре электролитической ванны:

$$\langle E \rangle = (-45,45 \pm 1,84) \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

2. В окрестности одного из электродов:

$$\langle E \rangle = (-43,48 \pm 1,84) \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

#### Выводы и анализ результатов работы

Проанализировав графики, приходим к выводу, что в первой конфигурации электростатического поля потенциал равномерно возрастает, так как наибольший потенциал у положительного электрода (правого) и наименьший у отрицательного (левого), а во второй конфигурации потенциал равномерно убывает до начала контура проводящего кольца, внутри кольца становится постоянным, так как во всех точках внутри контура кольца равный потенциал, после проводника потенциал продолжает равномерно убывать