

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ФАКУЛЬТЕТ ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ
НАПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМНОГО И ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 3.01

курса «физика»

**по теме: «Изучение электростатического поля методом
моделирования»**

Выполнил студент:

Тюрин Иван Николаевич

группа: Р32131

Преподаватель:

Захаров Д. В.,
Коробков М. П.

Санкт-Петербург, 2022 г.

Содержание

Лабораторная работа № 3.01. Изучение электростатического поля методом моделирования	2
1. Цель работы	2
2. Задачи решаемые при выполнении работы	2
3. Объект исследования	2
4. Метод экспериментального исследования	2
5. Рабочие формулы	3
6. Измерительные приборы	3
7. Схема установки	4
8. Результаты измерений	4
9. Результаты обработки измерений	5
1. Характеристики поля плоского конденсатора	5
2. Характеристики поля плоского конденсатора при наличии проводящего кольца	7
10. Графики зависимости потенциала от координаты по оси X . .	9
11. Итоговые результаты	9
12. Вывод	10

Лабораторная работа № 3.01

Изучение электростатического поля методом моделирования

1. Цель работы

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

2. Задачи решаемые при выполнении работы

1. Измерение распределения потенциала в модели плоского конденсатора.
2. Измерение распределения потенциала в модели плоского конденсатора при наличии проводящего тела между обкладками.

3. Объект исследования

Распределение потенциала в электростатическом поле

4. Метод экспериментального исследования

Моделирование, лабораторный эксперимент

5. Рабочие формулы

Средняя напряженность между двумя точками с потенциалами φ_1 и φ_2 :

$$\langle E_{12} \rangle \cong \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\ell_{12}}; \quad (1)$$

Оценка поверхностной плотности заряда на электроде:

$$\sigma' \cong -\varepsilon_0 \frac{\Delta\varphi}{\Delta\ell_n}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ — электрическая постоянная, $\Delta\varphi$ — изменение потенциала при смещении на малое расстояние $\Delta\ell_n$ по нормали проводника.

Абсолютная погрешность измерения напряженности между двумя точками:

$$\begin{aligned} \Delta_{E_{12}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial \varphi} \Delta\varphi\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \ell} \Delta\ell\right)^2} \\ &= \frac{2}{3\ell_{12}} \sqrt{(\Delta_{\text{И}\varphi})^2 + \left(\frac{(\varphi_1 - \varphi_2)\Delta_{\text{И}\ell}}{\ell_{12}}\right)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Относительная погрешность физической величины X :

$$\varepsilon_X = \frac{\Delta_X}{\langle X \rangle} \cdot 100\% \quad (4)$$

6. Измерительные приборы

№ п/п	Наименование	Используемый диапазон	Погрешность прибора
1	Вольтметр	От 0 В до 14 В	0,1 В
2	Линейная сетка	0 см до 30 см по оси OX , от 0 см до 20 см по оси OY .	0,1 мм

7. Схема установки

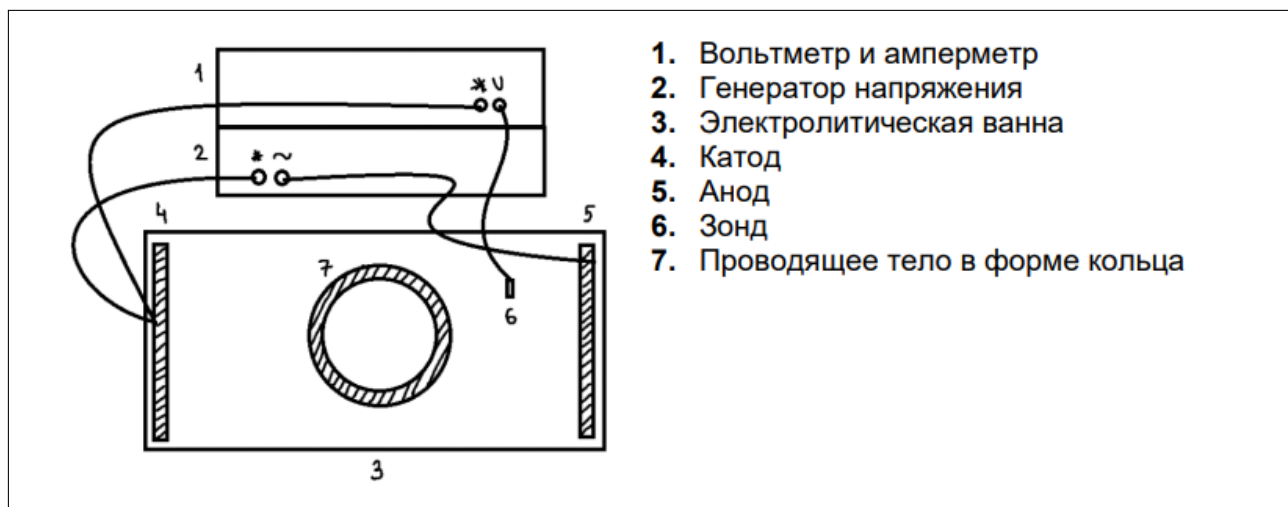


Рис. 1. Схема установки.

8. Результаты измерений

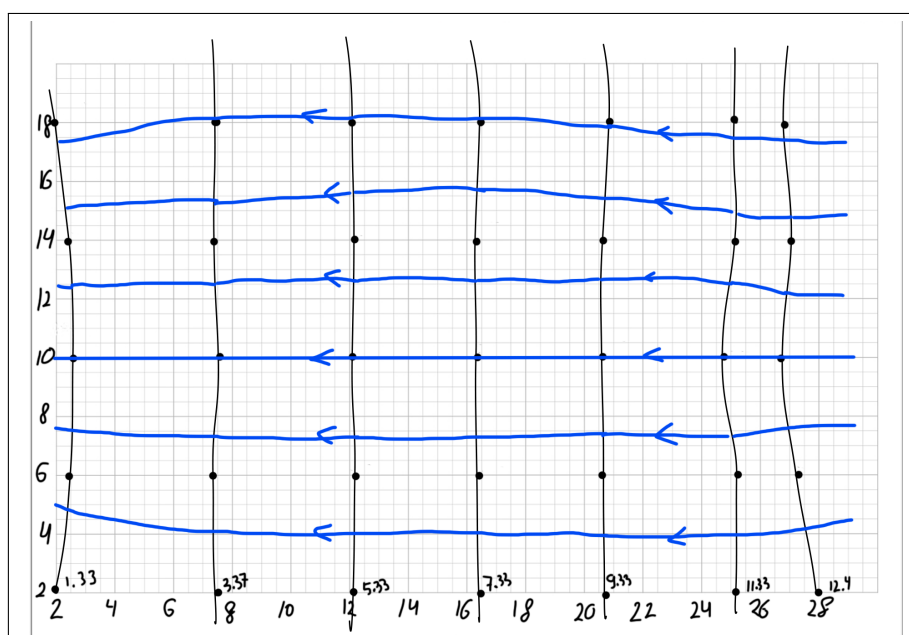


Рис. 2. Чертеж распределения потенциалов в электролитической ванне, моделирующего плоский конденсатор.

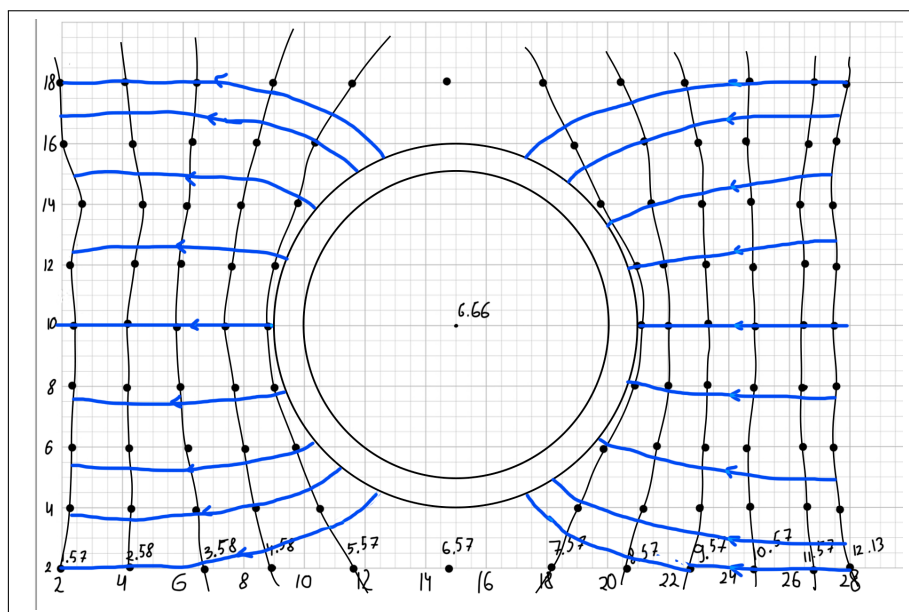


Рис. 3. Чертеж распределения потенциалов в электролитической ванне с внесенным проводящим кольцом.

9. Результаты обработки измерений

На обоих чертежах установки с отмеченными потенциалами точек провели эквипотенциальные линии, соединив точки с равным потенциалом плавными линиями, нарисовали систему силовых линий поля с указанием их направления.

9. 1. Характеристики поля плоского конденсатора

По формуле (1) рассчитаем величину (проекцию) напряженности в центре электролитической ванны (точка $(x_0; y_0) = (15\text{см}; 10\text{см})$). Для этого выберем ближайшие к ней точки вдоль одной силовой линии:

$$\varphi_1 = \varphi(x_1; y_0) |_{x=12 \text{ см}} = (5,330 \pm 0,005) \text{ В},$$

$$\varphi_2 = \varphi(x_2; y_0) |_{x=16,4 \text{ см}} = (7,330 \pm 0,005) \text{ В},$$

$$\ell_{12} = x_2 - x_1 = (4,4 \pm 0,05) \text{ см} = (0,0440 \pm 0,0005) \text{ м},$$

$$\langle E_{12} \rangle = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\ell_{12}} = \frac{-2 \text{ В}}{0,044 \text{ м}} \approx -45,45 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Рассчитаем погрешность для напряженности как для косвенно измеряемой величины по формуле (3) и (4):

$$\Delta_{E_{12}} = \frac{2}{3\ell_{12}} \sqrt{(\Delta_{\Pi\varphi})^2 + \left(\frac{(\varphi_1 - \varphi_2)\Delta_{\Pi\ell}}{\ell_{12}} \right)^2} \approx 0,353 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

$$\varepsilon_{E_{12}} = \frac{\Delta_{E_{12}}}{\langle E_{12} \rangle} \cdot 100\% \approx 0,78\%.$$

Аналогично найдем значение напряженности (проекцию) в окрестности правого электрода. Выберем точки ближайшие к электроду, потому что справа у нас имеется больше измерений близких к электроду, при этом рассмотрим силовую линию вдоль $y_0 = 10$ см, так как поле в центре электрода однороднее, чем с краю:

$$\varphi_1 = \varphi(x_1; y_0) |_{x_1=24,7 \text{ см}} = (11,330 \pm 0,005) \text{ В},$$

$$\varphi_2 = \varphi(x_2; y_0) |_{x_2=26,7 \text{ см}} = (12,400 \pm 0,005) \text{ В},$$

$$\ell_{12} = x_2 - x_1 = (2 \pm 0,05) \text{ см} = (0,0200 \pm 0,0005) \text{ м},$$

$$\langle E_{12} \rangle = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\ell_{12}} = \frac{-1,07 \text{ В}}{0,02 \text{ м}} \approx -53,50 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Рассчитаем погрешность для напряженности как для косвенно измеряемой величины по формуле (3) и (4):

$$\Delta_{E_{12}} = \frac{2}{3\ell_{12}} \sqrt{(\Delta_{\Pi\varphi})^2 + \left(\frac{(\varphi_1 - \varphi_2)\Delta_{\Pi\ell}}{\ell_{12}} \right)^2} \approx 0,907 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

$$\varepsilon_{E_{12}} = \frac{\Delta_{E_{12}}}{\langle E_{12} \rangle} \cdot 100\% \approx 1,70\%.$$

По формуле (2) оценим поверхностную плотность электрического заряда на электродах. Потенциал на левом и правом электродах в условиях эксперимента соответственно $\varphi_{\text{л}} = 0$ В и $\varphi_{\text{п}} = 14$ В. Опять же выберем точки на уровне $y_0 = 10$ см для большей однородности поля. Тогда для левого электрода возьмем вторую точку с $x_1 = (2,6 \pm 0,05)$ см и потенциалом $\varphi_1 = \varphi(x_1; y_0) = (1,33 \pm 0,005)$ В. И для правого — точку с $x_2 = (26,7 \pm 0,05)$ см и потенциалом $\varphi_2 = \varphi(x_2; y_0) = (12,4 \pm 0,005)$ В. Расстояние от левого электрода до точки φ_1 равно $\ell_{\text{л}} = 2,6$ см; от точки φ_2 до правого электрода равно $\ell_{\text{п}} = 3,3$ см.

В этом случае поверхностная плотность заряда на левом электроде можно оценить как

$$\sigma'_{\text{л}} \cong -\varepsilon_0 \frac{0 \text{ В} - \varphi_1}{\ell_{\text{л}}} \approx 4,527 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

на правом соответственно

$$\sigma'_\Pi \cong -\varepsilon_0 \frac{14 \text{ В} - \varphi_2}{\ell_\Pi} \approx -4,291 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Соответственно их погрешности по формулам для напряженностей (3):

$$\Delta_{\sigma'_\text{л}} = \frac{2\varepsilon_0}{3\ell_\text{л}} \sqrt{(\Delta_{\text{И}\varphi})^2 + \left(\frac{(\varphi_\text{л} - \varphi_1)\Delta_{\text{И}\ell}}{\ell_\text{л}} \right)^2} \approx 5,914 \cdot 10^{-12}; \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

$$\varepsilon_{\sigma'_\text{л}} = \frac{\Delta_{\sigma'_\text{л}}}{\sigma'_\text{л}} \cdot 100\% \approx 1,31\%$$

$$\Delta_{\sigma'_\text{п}} = \frac{2\varepsilon_0}{3\ell_\text{п}} \sqrt{(\Delta_{\text{И}\varphi})^2 + \left(\frac{(\varphi_1 - \varphi_\text{п})\Delta_{\text{И}\ell}}{\ell_\text{л}} \right)^2} \approx 4,425 \cdot 10^{-12}; \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

$$\varepsilon_{\sigma'_\text{п}} = \frac{\Delta_{\sigma'_\text{п}}}{\sigma'_\text{п}} \cdot 100\% \approx 1,03\%$$

9. 2. Характеристики поля плоского конденсатора при наличии проводящего кольца

Измеренный потенциал внутри проводящего кольца практически не отличается от значения $\varphi_\text{к} = 6,66 \text{ В}$, таким образом по формуле (1) величина напряженности равна $0 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$, в остальных же точках потенциал изменяется и стало быть напряженность не нулевая. Тогда мы нашли область с минимальным абсолютным значение напряженности равным $E_{\min} = 0 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$. Заметим, что наибольшая густота линий напряженности находится у поверхности проводящего кольца слева и справа на уровне $y_0 = 10 \text{ см}$, значит там будет наибольшая напряженность E_{\max} (при этом возьмем не самые ближайшие к поверхности точки, чтобы можно было корректно посчитать расстояние до контура кольца, а именно до точек слева и справа соответственно с координатами $x_{\text{кл}} = 9 \text{ см}$ и $x_{\text{кп}} = 21 \text{ см}$). Рассчитаем ее по формуле (1):

$$\varphi_1 = \varphi(x_1; y_0) |_{x_1=7,5 \text{ см}} = (4,580 \pm 0,005) \text{ В},$$

$$\ell_{1\text{к}} = x_{\text{кл}} - x_1 = (1,5 \pm 0,05) \text{ см} = (0,0150 \pm 0,0005) \text{ м},$$

$$\langle E_\text{л} \rangle = \frac{\varphi_1 - \varphi_\text{к}}{\ell_{1\text{к}}} = \frac{4,58 \text{ В} - 6,66 \text{ В}}{1,5 \text{ см}} \approx -138,667 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

$$\varphi_2 = \varphi(x_2; y_0) |_{x_2=22,1 \text{ см}} = (8,570 \pm 0,005) \text{ В},$$

$$\ell_{\text{к}2} = x_2 - x_{\text{кп}} = (1,1 \pm 0,05) \text{ см} = (0,0110 \pm 0,0005) \text{ м},$$

$$\langle E_{\pi} \rangle = \frac{\varphi_{\kappa} - \varphi_2}{\ell_{\kappa 2}} = \frac{6,66 \text{ В} - 8,57 \text{ В}}{1,1 \text{ см}} \approx -173,636 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

Рассчитаем погрешности для напряженностей по формуле (1):

$$\Delta_{E_{\pi}} = \frac{2}{3\ell_{1\kappa}} \sqrt{(\Delta_{\text{И}\varphi})^2 + \left(\frac{(\varphi_1 - \varphi_{\kappa})\Delta_{\text{И}\ell}}{\ell_{1\kappa}} \right)^2} \approx 3,089 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

$$\varepsilon_{E_{\pi}} = \frac{\Delta_{E_{\pi}}}{\langle E_{\pi} \rangle} \cdot 100\% \approx 2,23\%;$$

$$\Delta_{E_{\pi}} = \frac{2}{3\ell_{\kappa 2}} \sqrt{(\Delta_{\text{И}\varphi})^2 + \left(\frac{(\varphi_{\kappa} - \varphi_2)\Delta_{\text{И}\ell}}{\ell_{\kappa 2}} \right)^2} \approx 5,270 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2};$$

$$\varepsilon_{E_{\pi}} = \frac{\Delta_{E_{\pi}}}{\langle E_{\pi} \rangle} \cdot 100\% \approx 3,04\%.$$

Как можно видеть, большая по абсолютному значению напряженность по центру правой части поверхности кольца. Вероятно это связано с асимметричным расположением кольца в ванне и/или расстоянием до ближайшей измеренной точки (ведь мы посчитали приближенное значение напряженности). Таким образом мы нашли область с наибольшим абсолютным значением напряженности равным $E_{\max} = 173,636 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$. Стоит отметить, что в модели потенциал увеличивается слева направо, и, следовательно, в любой точке проекция напряженности на ось X будет отрицательной и минимальное и максимальное значение напряженности мы нашли верно.

10. Графики зависимости потенциала от координаты по оси X

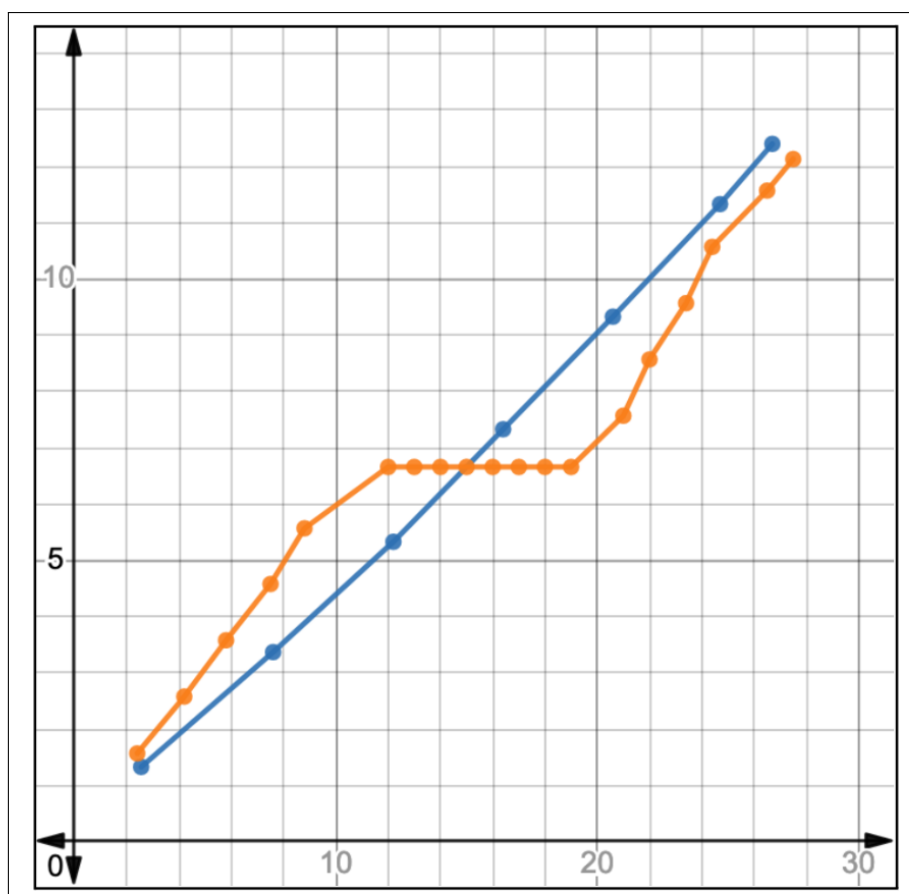


Рис. 4. Графики зависимостей потенциала φ от координаты по оси X , x (см) по горизонтали, $\varphi(x)$ (В) по вертикали..

Для двух моделей построили графики зависимости потенциала на уровне $y_0 = 10$ см от координаты по оси X (см. Рис. ??). Как можно видеть, потенциал линейно растет в однородном электрическом поле в электролите и остается постоянным внутри и на поверхности проводника. Так же можно видеть, что угол наклона графика характеризуется величиной напряженности в электролите, поэтому при втором моделировании с проводящим кольцом напряженность в электролите, в целом, была больше (за исключением области внутри кольца), чем в первом опыте.

11. Итоговые результаты

Напряженность в центре ванны в первом опыте:

$$\langle E_{\text{ц}} \rangle = (-45,450 \pm 0,353) \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}, \quad \varepsilon_{E_{12}} \approx 0,78\%;$$

напряженность в окрестности правого электрода в первом опыте:

$$\langle E_{12} \rangle = (-53,50 \pm 0,907) \frac{\text{КЛ}}{\text{М}^2}, \quad \varepsilon_{E_{12}} \approx 1,70\%;$$

поверхностные плотности заряда на электродах:

$$\sigma'_{\text{л}} = (4,527 \pm 0,059) \cdot 10^{-10} \frac{\text{КЛ}}{\text{М}^2}, \quad \varepsilon_{\sigma'_{\text{л}}} \approx 1,31\%;$$

$$\sigma'_{\text{п}} = (-4,291 \pm 0,043) \cdot 10^{-10} \frac{\text{КЛ}}{\text{М}^2}, \quad \varepsilon_{\sigma'_{\text{п}}} \approx 1,03\%.$$

Максимальная и минимальная напряженности в опыте с проводящим кольцом погруженным в ванну:

$$E_{\min} = 0 \frac{\text{КЛ}}{\text{М}^2};$$

$$E_{\max} = (-173,636 \pm 5,270) \frac{\text{КЛ}}{\text{М}^2}, \quad \varepsilon_{E_{\text{п}}} \approx 3,04\%.$$

12. Вывод

Построили сечение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля на основе экспериментального моделирования распределения потенциала в слабопроводящей среде.

В первом рассчитали величину напряженности в центре электролитической ванны и в окрестности одного из электродов, а именно правого. Их значения не сильно отличаются, поэтому можно считать модель плоского конденсатора правдоподобной. Рассчитали поверхностную плотность заряда на электродах, как и можно было ожидать, они приближенно равны по абсолютной величине и отличаются знаками.

Во втором эксперименте с помещенным в ванну проводящим кольцом определили область с минимальной (отсутствующей) напряженностью, ей оказалась область внутри проводящего кольца. И определили область с максимальной по абсолютному значению напряженностью — окрестность кольца слева и справа вдоль центральной прямой на уровне $y = 10$ см, это мы так же качественно проверили с помощью построенного графика.