

Группа \_\_\_\_\_ Р3224 К работе допущен \_\_\_\_\_  
Студент \_\_\_\_\_ Маликов Г. И. Работа выполнена \_\_\_\_\_  
Преподаватель \_\_\_\_\_ Смирнов А. В. Отчет принят \_\_\_\_\_

## Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе №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 слабо проводящей среде.

#### 2. Объект исследования.

В недистиллированную воду в электролитической ванне помещают два металлических проводника, подсоединенных к источнику переменного напряжения, заменяя моделируемое электростатическое поле электрическим.

#### 3. Метод экспериментального исследования.

Метод моделирования электростатического поля в проводящей среде.

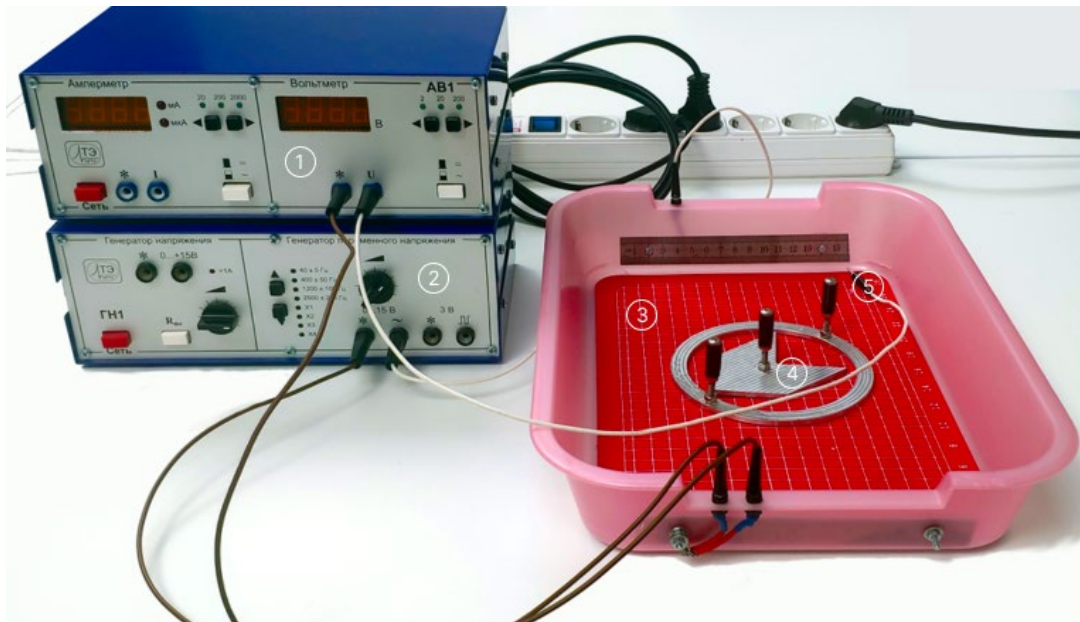
#### 4. Рабочие формулы и исходные данные.

$$\langle E \rangle \approx \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l_{12}}$$
$$\sigma' \approx -\varepsilon_0 \frac{\Delta\varphi}{\Delta l_n}$$
$$\varepsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$$

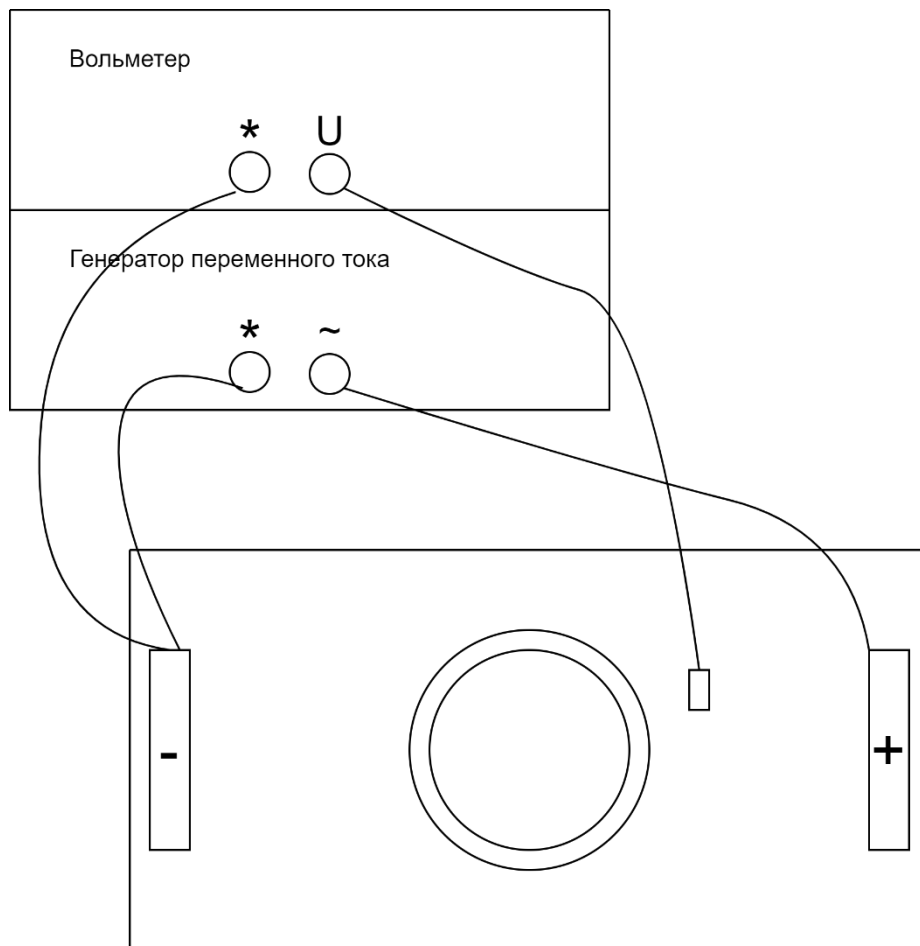
#### 5. Измерительные приборы.

№ п/п	Наименование	Тип прибора	Используемый диапазон	Погрешность прибора
1	Вольтметр	Электронный	0–20 В	0,1 В
2	Линейка	Механический	0–20 см	0.1 см

#### 6. Экспериментальная установка



*Рисунок 1 - Экспериментальная установка*



*Рисунок 2 - Схема установки*

## 7. Результаты прямых измерений и их обработка.

$y \backslash B$	2,8	4,8	6,8	8,8	10,8	12,8	Кольцо 6,7 В. (13,10) $r=6$
18	2	5,8	11,8	17	22,5	28,5	X, см
14	2,7	6	-	19	22,8	27,5	
10	3	5,6	-	20,1	23	27	
6	2,8	6	-	15,2	22,9	27,4	
2	2,2	6,4	11,5	17,9	22,9	28,3	

$y \backslash B$	1,77	3,77	5,77	7,77	9,77	11,77	Стрелка $\leftarrow$ 6,97 В
18	2	7,5	10,7	15,8	20,1	26,2	лист 2.3 21.03.24
14	3	7,4	11,2	15,1	20	25,2	
10	3,1	6,8	-	16,2	20,1	25	
6	2,7	6,8	10,8	16,2	20	25,3	
2	1,9	6,5	11,1	15,6	20,1	26	

$y \backslash B$	1,8	3,8	5,8	7,8	9,8	11,8	Стрелка $\rightarrow$ 6,94 В
18	2	7,2	11,5	15,7	20,4	26,1	
14	2,9	7	10,5	17,1	20,5	25,5	
10	3,1	6,9	10,1	-	20,9	25,2	
6	2,8	6,5	10,1	16	20,2	25,7	
2	1,9	6,5	10,9	15,3	20,1	26,1	

Рисунок 3 - Таблицы экспериментальных значений

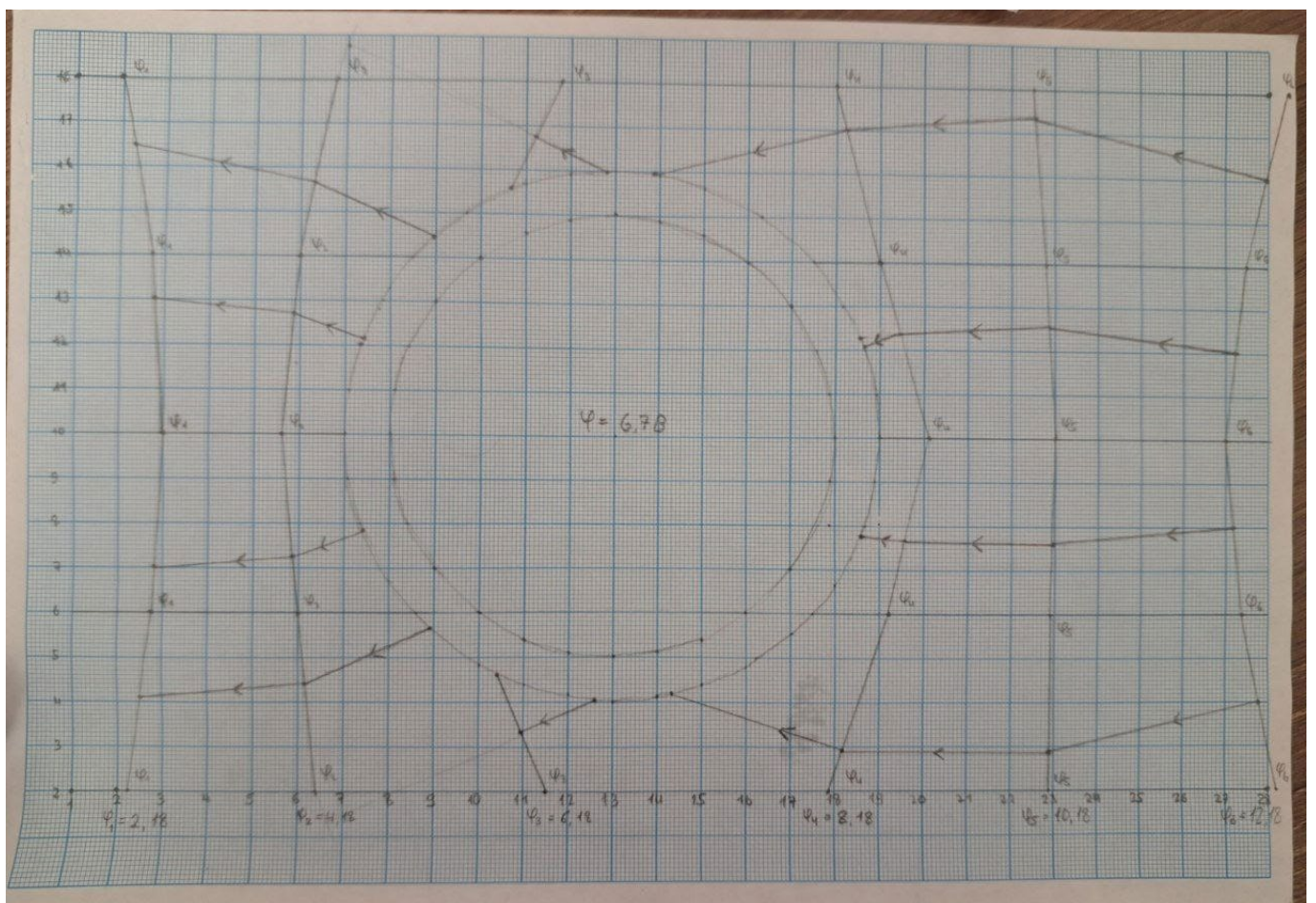


Рисунок 4 - Система силовых линий поля

Расчёт напряженности в центре ванны и возле одного из электродов:

$$\langle E_{21} \rangle = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l_{12}}$$

Средняя напряженность между эквипотенциальными линиями  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (величина напряженности в окрестности одного из электрода).

$$\langle E_{21} \rangle = \frac{4.18 - 2.18}{0.042} = 47.619 \pm 3.55 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Поверхностная плотность заряда между  $\varphi_2$  и  $\varphi_1$ :

$$\sigma' \approx -\varepsilon_0 \frac{\Delta\varphi_{21}}{\Delta l_{21}} \approx -8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \frac{2\text{В}}{0.042\text{м}} \approx -421.4 \cdot 10^{-12} \pm 23.3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

$E_{\min} = 0 \frac{\text{В}}{\text{м}}$  – данная точка располагается внутри кольца.

$E_{\max} \approx \frac{6.7 - 4.18}{0.014} = 180 \frac{\text{В}}{\text{м}} \pm 16.35 \frac{\text{В}}{\text{м}}$  – данная точка располагается между проводящим кольцом и эквипотенциальной линией  $\varphi_2$  в  $y = 10\text{см}$ .

## 8. Расчет погрешностей измерений

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= 0.1\text{В} \\ \Delta x &= 1\text{мм} = 0.001\text{м} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= \sqrt{\left( \frac{\partial \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l_{1,2}} \right)}{\partial \varphi_1} \Delta\varphi_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l_{1,2}} \right)}{\partial \varphi_2} \Delta\varphi_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l_{1,2}} \right)}{\partial l_{1,2}} \Delta l_{1,2} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( \frac{-\Delta\varphi_1}{l} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\varphi_2}{l} \right)^2 + \left( -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l^2} \Delta l \right)^2} = \\ &= \sqrt{2 \left( \frac{\Delta\varphi}{l} \right)^2 + \left( \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l^2} \Delta l \right)^2} \end{aligned}$$

Для средней напряженности между эквипотенциальными линиями  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ :

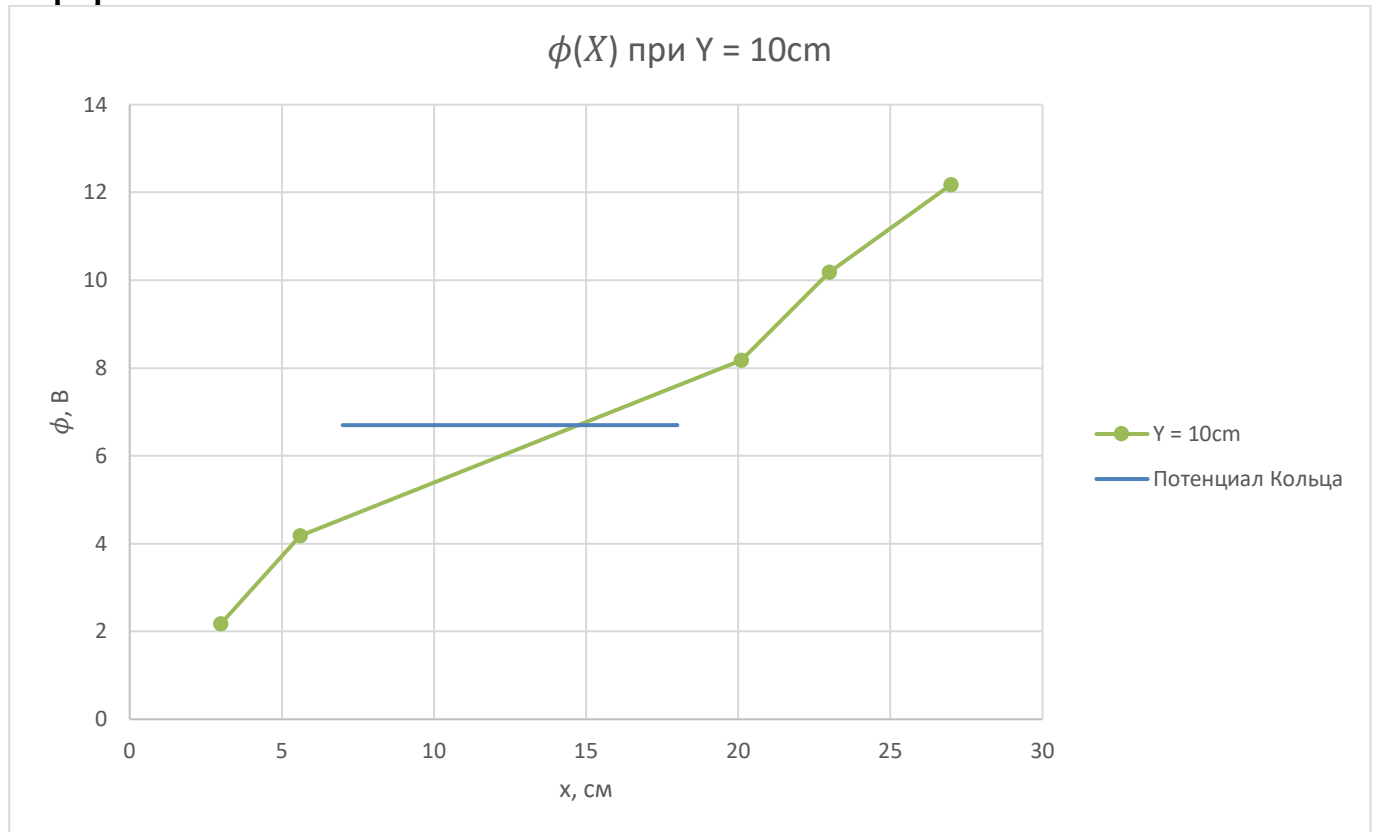
$$\sqrt{2 \left( \frac{0.1}{0.042} \right)^2 + \left( \frac{4.18 - 2.18}{0.042^2} 0.001 \right)^2} \approx 3.55 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

$$\begin{aligned} \Delta\sigma' &= \sqrt{\left( \frac{\partial \left( -\varepsilon_0 \frac{\Delta\varphi}{l} \right)}{\partial \varphi} \Delta\varphi \right)^2 + \left( \frac{\partial \left( -\varepsilon_0 \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} \right)}{\partial l} \Delta l \right)^2} = \\ &= \varepsilon_0 \sqrt{\left( \frac{\Delta\varphi}{l} \right)^2 + \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l^2} \Delta l \right)^2} \end{aligned}$$

Для поверхностной плотности заряда между  $\varphi_2$  и  $\varphi_1$ :

$$\varepsilon_0 \sqrt{\left(\frac{0.1\text{В}}{0.042\text{м}}\right)^2 + \left(\frac{2\text{В}}{0.042\text{м}^2} 0.001\text{м}\right)^2} \approx 23.3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

## 9. Графики



Зелёной линией отмечены координаты и значения потенциалов на линии  $y = 10\text{см}$ . Синим цветом, отмечено значение потенциала внутри кольца расположенной между  $x = 7\text{см}$  и  $x = 18\text{см}$ .

## 10. Выводы и анализ результатов работы.

В ходе лабораторной работы было проведено экспериментальное моделирование электростатического поля в слабо проводящей среде. Были построены сечения эквипотенциальных поверхностей и силовых линий, что позволило наглядно представить распределение потенциала в электролитической ванне.

Основной вывод работы заключается в том, что металлический проводник в электростатическом поле действует как эквипотенциал, так как разность потенциалов внутри него равна нулю. Это демонстрирует отсутствие напряжения внутри проводника и подтверждает теоретические положения о проводниках в электростатическом поле.



## 11. Вопросы

е.м. 

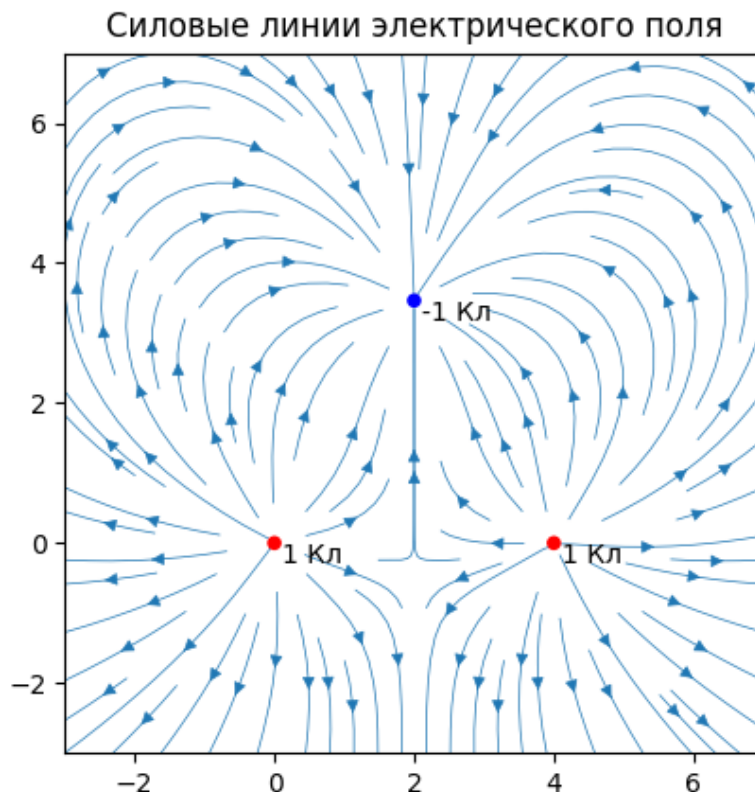
- 1 → Дайте содержательное название диаграмме.
- 2 → Куда направлены силовые линии на диаграммах?
- 3 → Изобразить силовые линии электрического поля системы трех одинаковых по модулю зарядов, помещенных в вершины равностороннего треугольника, когда один заряд отрицательный, два других — положительные.
- 4 → Найти поверхностную плотность заряда в точках А, В, С моделируемой системы.
- 5 → Найти электрическую энергию, сосредоточенную в  $1 \text{ мм}^3$  вблизи указанной точки D моделируемой системы при диэлектрической проницаемости среды 2.
- 6 → Найти скорость, которую приобрел бы электрон, пройдя в вакууме из состояния покоя разность потенциалов  $10 \text{ кВ}$ .
- 7 → Пусть в ванну залито  $0,5$  литра воды. Насколько нагреется вода при проведении измерений (1 час), если через ванну проходит ток  $10 \text{ мА}$ ?

3.

Электрическое поле создаётся за счет вычисления вклада каждого заряда с использованием закона

Кулона по формуле  $E = k \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{r}_i}{r_i^2}$ .

Красным изображены положительные заряды, синим отрицательный



4. Поверхностная плотность зарядов в точках А, В, С

$$\sigma' \approx -\varepsilon_0 \frac{\Delta \varphi_A}{\Delta l_A} \approx -8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \frac{4.18 \text{ В} - 6.7 \text{ В}}{0.07 \text{ м} - 0.056 \text{ м}} \approx 1593 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

$$\sigma' \approx -\varepsilon_0 \frac{\Delta \varphi_B}{\Delta l_B} \approx -8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \frac{6.7 \text{ В} - 6.18 \text{ В}}{0.02385 \text{ м}} \approx -192.9 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

$$\sigma' \approx -\varepsilon_0 \frac{\Delta\varphi_c}{\Delta l_c} \approx -8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \frac{8.18\text{В} - 6.7\text{В}}{0.201\text{м} - 0.19\text{м}} \approx -1190 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

5. Электрическая энергия находится как  $W = \int \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} dV$

Предположим, что поле около точки D однородно, тогда:

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V$$

Напряженность около точки D:

$$\langle E_{21} \rangle = \frac{4.18 - 2.18}{0.026} \approx 76.92 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

$$W = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot \frac{2}{2} \cdot 76.92 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{м}^3 \approx 6.8 \cdot 10^{-19} \text{Дж}$$

6. Работа при перемещении заряда в электрическом поле идет на увеличение кинетической энергии электрона:

$$\begin{aligned} A &= \Delta W_k \\ A &= q(\varphi_1 - \varphi_2) \\ \Delta W_k &= \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \end{aligned}$$

Приравнявая, получаем:

$$q(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

Так как электрон был в состоянии покоя:

$$\begin{aligned} qU &= \frac{mv_2^2}{2} \\ v &= \sqrt{\frac{2qU}{m}} \end{aligned}$$

Подставляем

$$\begin{aligned} q &= 1.6 \cdot 10^{-19} \text{Кл} \\ m &= 9.1 \cdot 10^{-31} \text{кг} \\ U &= 10000 \text{В} \\ v &= \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{Кл} \cdot 10000 \text{В}}{9.1 \cdot 10^{-31} \text{кг}}} \approx 5.93 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}} \end{aligned}$$

7. По закону Джоуля — Ленца можно определить тепловую энергию, которая передается через электрический ток:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

и через формулу:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c}$$

можно найти изменение температуры.

Возьмём удельное сопротивление питьевой воды как  $2.1 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{м}$  при  $20^\circ \text{C}$

Сопротивление можно вычислить по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

Предположим, что вода в ванне имеет форму куба, тогда  $l = S$ , и формула упрощается до:

$$R = \rho$$

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = (10 \times 10^{-3})^2 \cdot 2.1 \times 10^3 \cdot 3600 = 756 \text{ Дж}$$

m - масса воды (в кг),

c - удельная теплоемкость воды (4200 Дж/(кг·К) при 20°C),

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{756}{0.5 \cdot 4200} = 0.36 \text{ °C}$$