

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

---

**Физический факультет**  
**кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка**  
**по общему физическому практикуму**

**Лабораторная работа № 308**

**ПОТЕНЦИАЛ И НАПРЯЖЕННОСТЬ**  
**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ**  
**ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА**

**Описание составили**  
**профессор Казей З.А., доцент Гайдукова И.Ю.,**  
**доцент Богданов А. Е.**

**МОСКВА 2024**



# ПОТЕНЦИАЛ И НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРО- СТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА

**Цель работы:** исследование распределения потенциала и напряженности электростатического поля цилиндрического конденсатора; сравнение экспериментальных характеристик поля с теоретическими расчетами.

В теоретическом введении приводятся основные понятия и определения характеристик электростатического поля. При подготовке к задаче следует ознакомиться с указанными разделами в литературе (напряженность и потенциал электростатического поля, связь между этими характеристиками, принцип суперпозиции, теорема Гаусса о потоке вектора напряженности, применение теоремы Гаусса для расчета модельных полей).

## I. Теоретическое введение

### Электрический заряд и электростатическое поле. Закон Кулона.

Заряженные тела, как известно из опыта, взаимодействуют друг с другом посредством электромагнитного поля. Это взаимодействие зависит от величины и знака электрического заряда, который считается фундаментальной характеристикой вещества. В системе СИ единица заряда кулон (Кл) является производной и определяется через основную электрическую единицу силы тока ампер,  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ .

Основу теории электричества составляет экспериментальный закон Кулона, описывающий взаимодействия двух точечных зарядов (заряженных тел, размеры которых существенно меньше расстояния между ними). В векторной форме в вакууме этот закон имеет вид:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}, \quad (1)$$

где  $\vec{F}_{12}$  - сила, действующая на заряд  $q_1$  со стороны заряда  $q_2$ ,  $\vec{r}_{12}$  - вектор, направленный к заряду  $q_1$  от заряда  $q_2$ . Величина  $\epsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$  называется электрической постоянной и определяется экспериментально.

В задаче изучаются основные свойства статического электрического (электростатического; далее используется также термин электрическое поле) поля в вакууме, имеющего постоянные во времени характеристики и создающегося зарядами, распределение которых в пространстве не изменяется со временем.

**Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции. Линии напряженности.** Произвольное электростатическое поле, создаваемое какой-либо системой зарядов, в любой его точке можно описывать вектором напряженности  $\vec{E}$ . *Напряженность электрического поля равна отношению силы  $\vec{F}$ , действующей на пробный заряд  $q_0$ , к величине этого заряда*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (2)$$

Вектор  $\vec{E}$  в данной точке полностью определяется системой зарядов, создающих поле, и не зависит от величины пробного точечного заряда  $q_0$ , которая выбирается настолько малой, чтобы не исказить поле. Единицей напряженности в СИ является 1 Н/Кл (ньютон на кулон) или 1 В/м (вольт на метр). Напряженность поля точечного заряда  $q$  в точке с радиус-вектором  $\vec{r}$  получается из закона Кулона

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}. \quad (3)$$

Для напряженности электрического поля выполняется принцип суперпозиции (наложения), согласно которому вектор напряженности поля  $\vec{E}$ , создаваемого системой зарядов, в каждой точке пространства равен сумме векторов напряженностей полей  $\vec{E}_{(i)}$ , которые создавались бы в этой точке каждым зарядом системы в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_{(i)}. \quad (4)$$

Для наглядного представления картины векторного электрического поля используют линии напряженности поля (силовые линии). Касательные к этим линиям задают направление вектора  $\vec{E}$  в каждой точке поля, а плотность линий, т. е. число линий, пересекающих перпендикулярную к ним единичную площадку, пропорциональна модулю

вектора  $\vec{E}$ . Линии напряженности электростатического поля идут непрерывно вне заряженных тел и прерываются на зарядах. Линии начинаются/кончатся на положительных/отрицательных зарядах (или в бесконечности; рис. 1). Этот вывод является прямым следствием теоремы Гаусса (см. далее стр. 6).

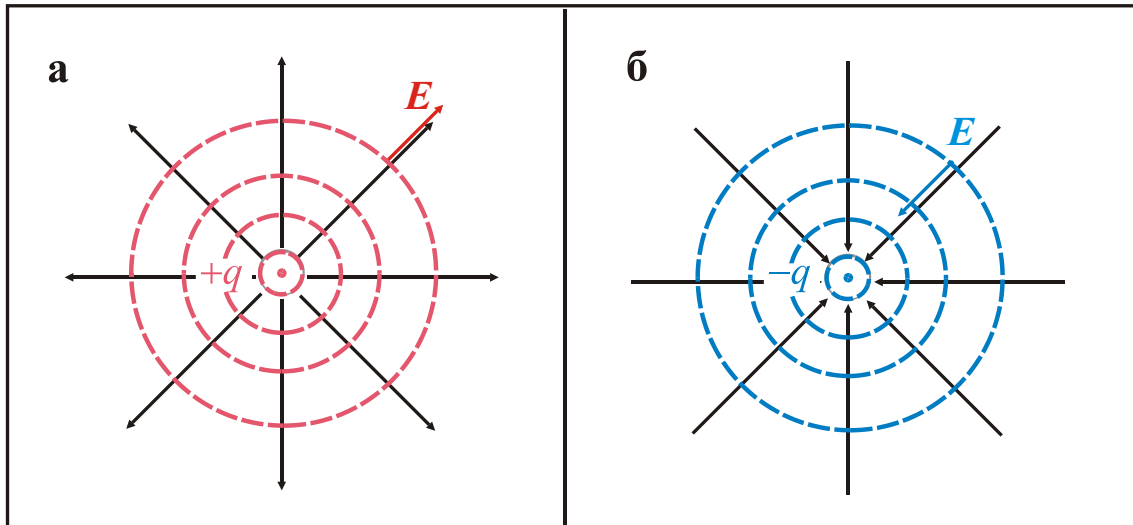


Рис. 1. Эквипотенциальные поверхности (цветные пунктирные линии) и линии напряженности (черные сплошные линии) электрического поля точечных зарядов

**Потенциал и разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности. Работа электростатических сил при перемещении заряда в поле.**

Электростатические силы, описываемые законом Кулона, потенциальны, а пробный заряд в электростатическом поле обладает потенциальной энергией. Работа этих сил  $A_{1,2}(x, y, z)$  зависит только от начального 1 и конечного 2 состояния системы и не зависит от конкретной траектории, по которой перемещался пробный заряд. Потенциальная энергия  $W_{nom}(x, y, z)$  определяется работой, совершаемой силами поля при перемещении пробного заряда из рассматриваемой точки  $(x, y, z)$  в точку отсчета потенциальной энергии (в качестве такой точки чаще всего выбирается бесконечно удаленная точка)

$$W_{nom}(x, y, z) = A_{x,y,z;\infty} = \int_{x,y,z}^{\infty} F_l dl = q_0 \int_{x,y,z}^{\infty} E_l dl \quad (5)$$

где  $F_l$  и  $E_l$  – проекции векторов силы и напряженности электрического поля на направление перемещения.

Отношение потенциальной энергии пробного заряда в данной точке поля к величине пробного заряда, которое не зависит от величины пробного заряда, называется потенциалом электростатического поля в этой точке

$$\varphi(x, y, z) = \frac{W_{nom}(x, y, z)}{q_0} = \int_{x, y, z}^{\infty} E_l dl . \quad (6)$$

Работу, совершаемую силами поля при перемещении пробного заряда  $q_0$  из точки  $B$  поля в точку  $C$ , можно выразить через разность потенциалов

$$A_{BC} = q_0(\varphi(B) - \varphi(C)) . \quad (7)$$

Единица потенциала в СИ называется "вольт",  $1В = 1 Дж/1 Кл$ .

Для потенциала также выполняется принцип суперпозиции: потенциал  $\varphi$  поля системы зарядов в любой точке равен сумме потенциалов полей  $\varphi_i$ , создаваемых в этой точке каждым  $i$ -м зарядом системы в отдельности:

$$\varphi = \sum_i \varphi_i . \quad (8)$$

Потенциал поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него дается формулой:

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} . \quad (9)$$

Совокупность точек с одинаковыми значениями потенциала образует поверхность равного потенциала - эквипотенциальную поверхность. Любая линия напряженности пересекает любую эквипотенциальную поверхность под прямым углом (рис. 1).

Интегральная связь между напряженностью и потенциалом дается формулой (6). Также используется локальное соотношение между напряженностью и потенциалом электростатического поля в одной точке. Напряженность направлена в сторону наиболее быстрого убывания потенциала и по модулю равна взятой с обратным знаком производной потенциала по этому направлению.

$$E = -\left(\frac{d\varphi}{dl}\right)_{\text{в напр. } \vec{E}}, \quad \vec{E} = -\vec{\text{grad}} \varphi . \quad (10)$$

Это соотношение можно записать, используя проекции вектора  $\vec{\text{grad}} \varphi$  на оси  $x, y, z$  декартовой системы координат:

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} . \quad (11)$$

### **Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса в интегральной форме.**

Для характеристики свойств электростатического поля вводится скалярная величина - поток вектора напряженности через поверхность. В общем случае, когда поле неоднородно и поверхность  $S$  не плоская, сначала определяется поток вектора напряженности  $\Delta\Phi$  для малого участка  $\Delta S$  поверхности в виде

$$\Delta\Phi = (\vec{E} \cdot \Delta\vec{S}) = E\Delta S \cos\alpha = E_n\Delta S, \quad (12)$$

где  $E$  и  $E_n$  - модуль вектора напряженности и его проекции на нормаль  $\vec{n}$  к участку поверхности  $\Delta S$ ,  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{n}$ . Полный поток напряженности  $\Phi$  через поверхность  $S$  получается при суммировании потоков  $\Delta\Phi_i$  через малые участки при  $\Delta S_i \rightarrow 0$ :

$$\Phi = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \sum_{\Delta S_i} E_n \Delta S_i = \int_S E_n dS. \quad (13)$$

Для замкнутой поверхности принято выбирать внешнюю нормаль к поверхности, тогда поток положителен на тех участках, где линии напряженности выходят из поверхности ( $\alpha < \pi/2$ ,  $E_n > 0$ ,  $\Delta\Phi > 0$ ) и отрицателен там, где линии напряженности входят в поверхность ( $\alpha > \pi/2$ ,  $E_n < 0$ ,  $\Delta\Phi < 0$ ).

Для электростатического поля справедлива следующая фундаментальная теорема о потоке (теорема Гаусса): поток вектора напряженности через любую замкнутую поверхность пропорционален суммарному заряду, находящемуся внутри этой поверхности:

$$\oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i. \quad (14)$$

**Проводники в электростатическом поле.** Электростатическое поле зависит от распределения заряда на телах, когда они заряжены или помещены в поле. В проводниках существуют свободные заряды, которые под действием постоянного электрического поля могут перемещаться в пределах проводника, приводя к возникновению электрического тока. Опыт показывает, что в случае электростатического поля на проводнике достаточно быстро установится равновесное, т. е. не изменяющееся во времени, распределение заряда. При установившемся распределении заряда (и при отсутствии источников тока) в проводнике нет токов, т. е. на свободные электроны не действуют силы и, следовательно, электростатическое поле внутри проводника  $E_{внутр} = 0$ .

При этом в любом малом объеме проводника положительные и отрицательные заряды скомпенсированы (объемная плотность заряда  $\rho = 0$ ), и нескомпенсированный заряд может располагаться только по поверхности проводника. Поскольку поле внутри проводника отсутствует, работа по перемещению пробного заряда внутри проводника равна нулю и потенциал во всех точках проводника одинаков. Поверхность проводника является эквипотенциальной, при этом линии напряженности начинаются на поверхности и выходят наружу перпендикулярно поверхности.

**Моделирование электростатического поля при помощи электролитической ванны.** Для изучения электрического поля между электродами различной формы часто используется электролитическая ванна, которая представляет собой сосуд, заполненный слабо проводящей электрический ток жидкостью (электролитом). В жидкость погружены металлические электроды, между которыми за счет источника ЭДС поддерживается необходимая разность потенциалов, и в жидкости возникает электрический ток.

Задача нахождения электростатического поля между заряженными электродами в вакууме может быть заменена задачей о нахождении электрического поля, возникающего при протекании тока через электролитическую ванну. В условиях задачи можно считать, что поверхности электродов в электролитической ванне, так же как в случае электростатики, являются практически эквипотенциальными поверхностями, благодаря их незначительному сопротивлению по сравнению с сопротивлением электролита (падение потенциала вдоль проводника, пропорциональное его сопротивлению, очень мало).

При этом, поскольку электролит в целом электрически нейтрален, двигающиеся в электролите заряды электрического поля не создают, и все электрическое поле между электродами целиком определяется зарядами (или потенциалами) электродов. Таким образом, электрические поля 1) вокруг погруженных в электролитическую ванну электродов при протекании в ней тока и 2) между заряженными до такой же разности потенциалов электродами в вакууме - имеют одинаковую картину силовых линий и эквипотенциальных поверхностей.

При прохождении постоянного тока через электролит в результате электролиза возникает их поляризация – скачки потенциала на поверхности электродов. Для устранения искажения распределения потенциала между электродами за счет поляризации в электролитической ванне вместо постоянного тока используется переменный.

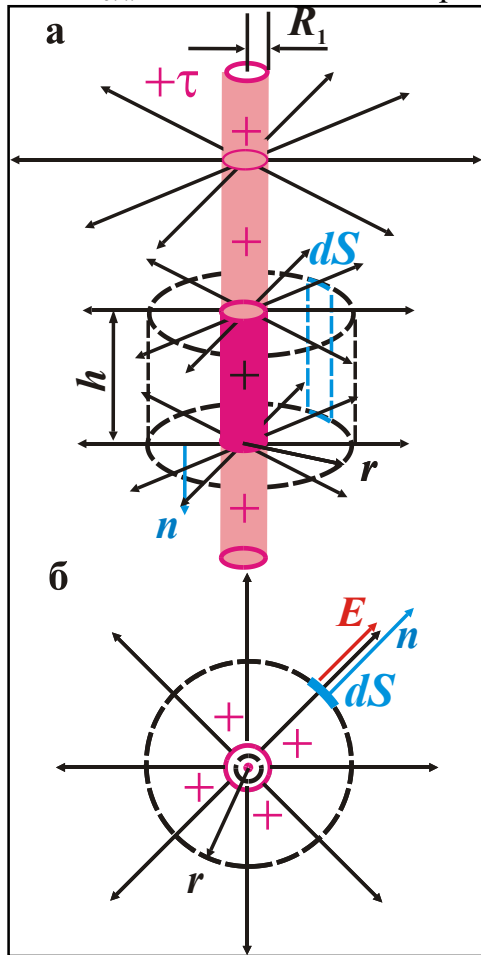
## **II. Расчет напряженности электростатического поля цилиндрического конденсатора**

**Поле равномерно заряженного цилиндра.** Вначале рассчитаем, используя теорему Гаусса, вектор напряженности поля бесконечного цилиндра, равномерно заряженного по поверхности с линейной плотностью заряда  $\tau > 0$ . Линейной плотностью заряда  $\tau$  (заряд единицы длины) называется отношение заряда  $\Delta q$ , приходящегося на малый элемент длины  $\Delta l$ , к этой длине:  $\tau = \Delta q / \Delta l$ . Основываясь на симметрии распределения заряда можно сделать заключение, что напряженность поля всюду направлена по полярному радиусу перпендикулярно оси цилиндра и одинакова по



модулю во всех точках, равноудаленных от оси (рис. 2 а). Для расчета напряженности в точке  $r$  выберем в теореме о потоке (см. формулу (14)) замкнутую поверхность (вымышленную, “нереальную”, которая показана на рис. пунктиром) в виде прямого цилиндра, коаксиального (соосного, т. е. имеющего ту же ось) с заряженным, радиуса  $r > R_1$  и высоты  $h$  ( $R_1$  – радиус заряженного цилиндра).

Поток напряженности через поверхность этого цилиндра складывается из потоков через боковую поверхность и два основания:  $\Phi = \Phi_{\text{б.н.}} + \Phi_1 + \Phi_2$ . Поток через основания  $\Phi_1 = \Phi_2 = 0$ , так как всюду на



них  $\vec{E} \perp \vec{n}$  и, следовательно,  $E_n = 0$ . Во всех точках боковой поверхности напряженность одинакова и  $E_n = E$ , (рис. 2 б, проекция на плоскость, перпендикулярную оси), поэтому

$$\Phi_{\text{б.н.}} = \int_S E_n dS = E \int_S dS = E(2\pi r h), \quad (15)$$

где  $S = 2\pi r h$  – площадь боковой поверхности цилиндра. Это выражение для потока остается справедливым для любой точки наблюдения  $r$ . Заряд, заключенный внутри замкнутой цилиндрической поверхности, расположен на выделенной более темным цветом части заряженного цилиндра и равен  $\tau h$ , так что по теореме Гаусса имеем  $2\pi r h E = \tau h / \epsilon_0$ . Отсюда, используя обозначение  $U_C = \tau / 2\pi \epsilon_0$ , имеем

$$E(r) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_0 r} = \frac{U_C}{r} \quad (16)$$

**Рис. 2.** К расчету потока  $\Phi$  напряженности поля заряженного цилиндра (а – общий вид, б - вид сверху) электростатического поля

(рис. 3). Для проводника нескомпенсированный заряд распределен по поверхности, поэтому напряженность полого и сплошного проводящих

Внутри заряженного цилиндра для  $r < R_1$  (область показана пунктиром на рис. 2 б) зарядов нет, поэтому аналогичное рассмотрение показывает, что напряженность  $E$  там равна нулю

заряженных цилиндров будет одинакова. Очевидно, что поле отрицательно заряженного цилиндра ( $\tau < 0$ ) отличается от рассмотренного случая только тем, что напряженность направлена к оси цилиндра.

Таким образом, для напряженности вдоль полярного радиуса  $r$  бесконечных коаксиальных цилиндров с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , равномерно заряженных по поверхности с линейной плотностью заряда  $\pm\tau$ , получаем, соответственно (используя обозначение  $U_C = \tau/2\pi\epsilon_0$ )

$$E_+(r) = \begin{cases} 0, & r \leq R_1 \\ \frac{U_C}{r}, & r \geq R_1 \end{cases}, \quad E_-(r) = \begin{cases} 0, & r \leq R_2 \\ \frac{-U_C}{r}, & r \geq R_2 \end{cases} \quad (17)$$

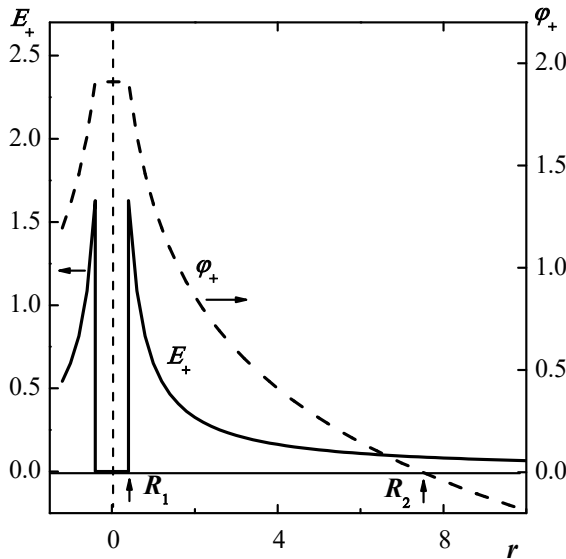


Рис. 3. Зависимость напряженности и потенциала электрического поля заряженного цилиндра от расстояния  $r$

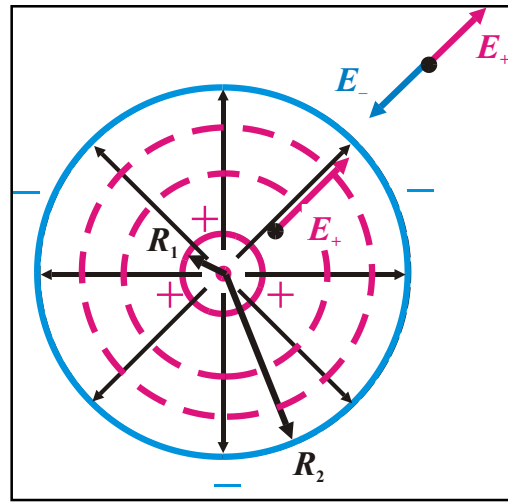


Рис. 4. Линии напряженности (черные сплошные) и эквипотенциальные поверхности (цветные пунктирные) электрического поля цилиндрического конденсатора

**Поле цилиндрического конденсатора.** Цилиндрический конденсатор образован двумя коаксиальными бесконечными цилиндрическими проводниками с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , заряженными с одинаковой по модулю линейной плотностью  $\pm\tau$  (рис. 4). Для цилиндрического конденсатора результирующая напряженность  $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$  определяется по принципу

суперпозиции, направлена вдоль полярного радиуса и описывается кусочно-заданной функцией

$$E(r) = \begin{cases} 0, & r \leq R_1, \quad r \geq R_2 \\ U_C / r, & R_1 \leq r \leq R_2 \end{cases} \quad (18)$$

области  $r > R_2$  напряженности  $E_+$  и  $E_-$  от заряженных цилиндров компенсируют друг друга (ф-ла (17)).

Для потенциала внутри конденсатора в области  $R_1 < r < R_2$ , используя связь между потенциалом и напряженностью (ф-ла (6)), получим

$$\varphi(r) = \int_r^\infty E_r(r) dr = \int_r^{R_2} \bar{E}_r(r) dr + \int_{R_2}^\infty E_r(r) dr, \quad (19)$$

где определенный интеграл разбивается на два для разных интервалов в формуле (18) и второй интеграл равен нулю, так как  $E_r = E = 0$  при  $r > R_2$ .

$$\varphi(r) = U_C \int_r^{R_2} \frac{dr}{r} = U_C \ln r \Big|_r^{R_2} = -U_C \ln \frac{r}{R_2}. \quad (20)$$

В задаче измеряется разность потенциалов (напряжение)  $U(r) = \Delta\varphi(r) = [\varphi(r) - \varphi(R_2)]$  между точками с радиус-векторами  $r$  и  $R_2$  (отрицательный электрод). Используя напряжение между электродами  $U_0 = \varphi(R_1) - \varphi(R_2) = U_C \ln(R_2/R_1)$ , получим во всей области вдоль полярного радиуса  $r$ .

$$U(r) = \begin{cases} 0, & r \geq R_2 \\ -U_C \ln(r/R_2), & R_1 \leq r \leq R_2 \\ U_0, & r \leq R_1 \end{cases} \quad (21)$$

$$E_r(x) = -\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{-U_C}{r} \quad (22)$$

ности вдоль радиуса для конденсатора (ф-ла (10)) в области  $R_1 < r < R_2$

Здесь учитывается, что при сложении антипараллельных векторов  $\bar{E}_+$  и  $\bar{E}_-$  нужно сложить их проекции на радиус-вектор  $r$ , а в

Именно это распределение потенциала экспериментально исследуется в настоящей задаче. Зная распределение потенциала  $U(r)$ , можно получить зависимость  $E_r(r)$  проекции вектора напряженности

### Экспериментальная установка

Для изучения распределения потенциала электростатического поля цилиндрического конденсатора в электролитической ванне используется установка, схема и общий вид которой представлены на рис. 5 и 6, соответственно

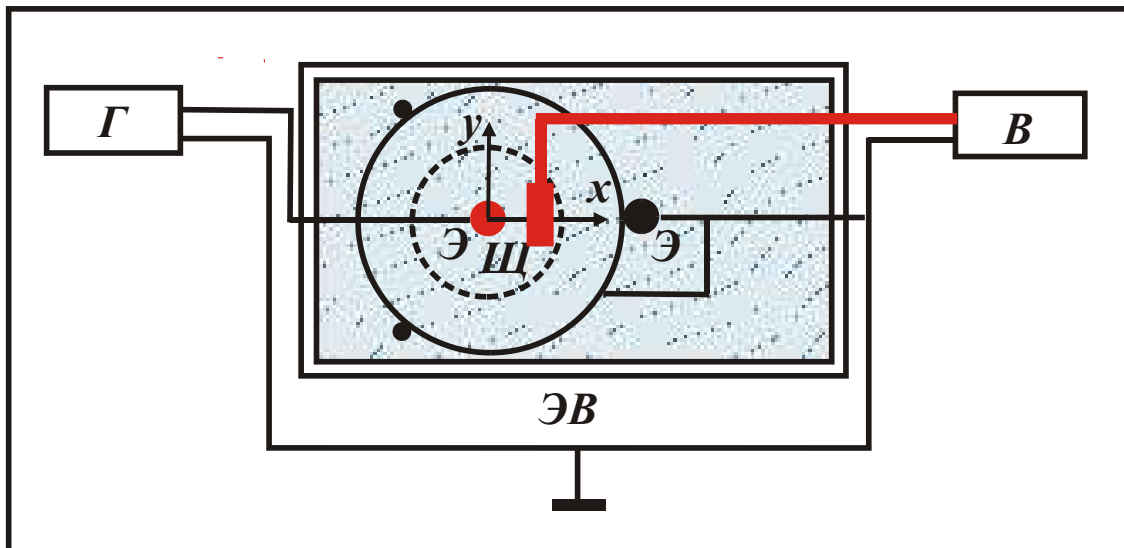


Рис. 5. Схема соединения приборов: Г – генератор, В – вольтметр, ЭВ – электролитическая ванна, Э – электроды, Щ – измерительный щуп

В состав установки входят приборы:

1. Цифровой генератор AWG - 4150
2. Цифровой вольтметр GDM – 78261

Включение используемых приборов и их настройка проводится лаборантом. Перед выполнением работы проверяется правильность настройки и установки параметров выходного сигнала генератора AWG-4150 и вольтметра GDM-78261. Расположение и функциональное назначение основных органов управления используемых генератора и вольтметра, а также краткие рекомендации по их установке приводятся для ознакомления в Приложении 2 на стр. 28.

Параметры выходного сигнала генератора, отображаемые на его дисплее, должны иметь следующие значения (рис. 6):

- кабель подключен к выходу канала CH1 (1)
- используемый канал выхода – CH1 (2, лампочка Output горит)
- форма сигнала – синусоидальная (3, лампочка Sine горит)
- частота сигнала - 1.000 000 KHz (1 кГц) (4)
- амплитуда сигнала – от 2.5 до 3.5 Vrms по указанию преподавателя (root mean square –эффективное значение) (5)
- offset 0.0mVdc (6, постоянная составляющая сигнала отсутствует)

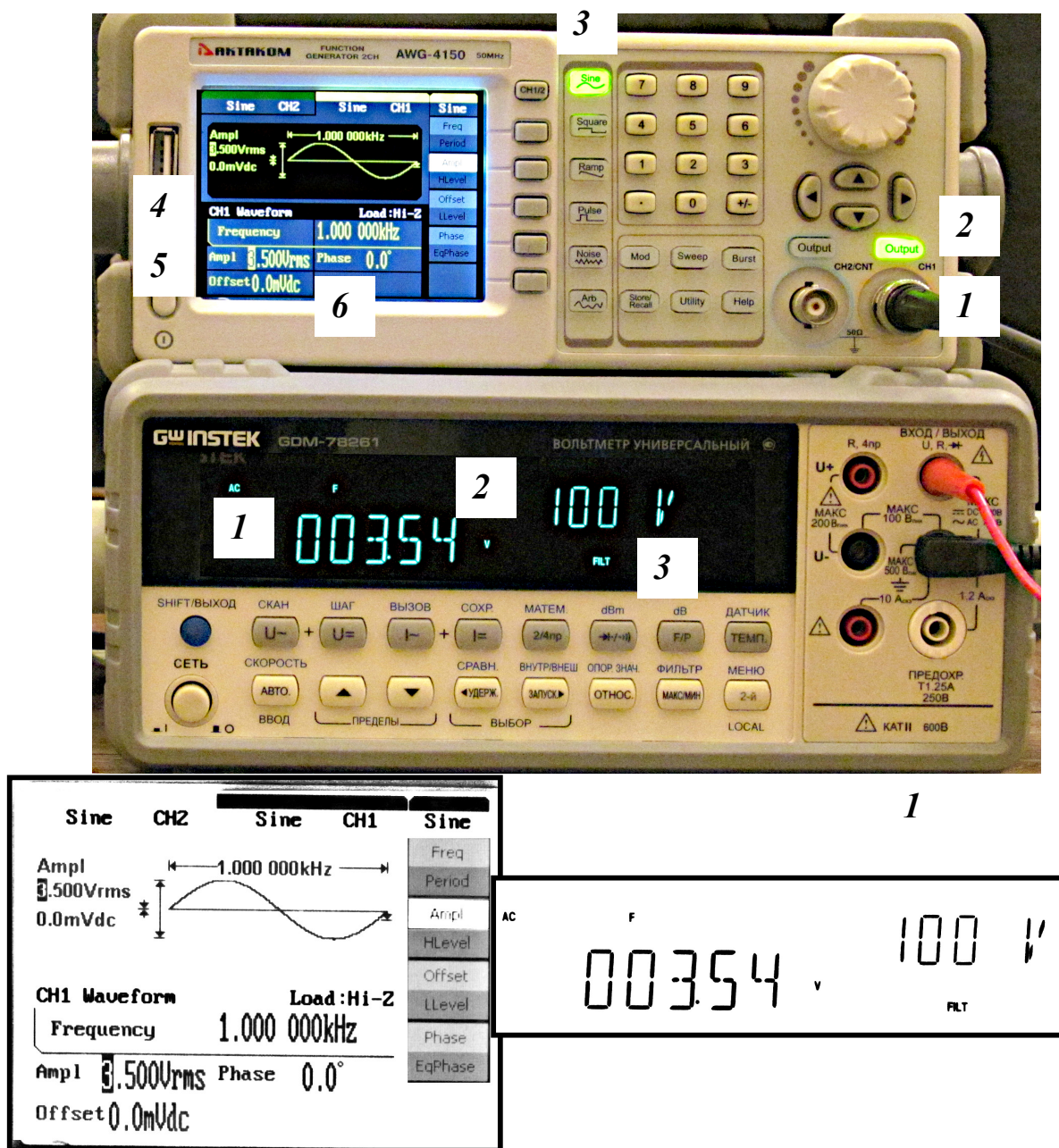


Рис. 6. Общий вид установки и дисплеев приборов с заданными параметрами

Установки цифрового вольтметра GDM-78261 должны иметь следующие значения:

- режим измерения переменного напряжения (1, на дисплее горит AC)
- предел измерения – 100 V (2, три значащие цифры сигнала)
- фильтр включен (3, на дисплее горит FILT)
- подключение щупов с черным и красным проводами как на фото

*Если какой-либо из параметров генератора или вольтметра не*

*соответствует требуемой установке, следует обратиться к лаборанту или преподавателю для его корректировки*

## Проведение эксперимента

По указанию преподавателя выполняется одно или несколько упражнений.

### Упражнение 1

#### Измерение распределения потенциала в цилиндрическом конденсаторе с параметрами $R_1 = 0.4$ см и $R_2 = 7.5$ см

1. Положить масштабную сетку с цилиндрическими электродами на дно электролитической ванны и налить воду так, чтобы электроды были полностью покрыты водой. Провода, закрепленные на сетке и подводящие напряжение к электродам, должны располагаться внизу. Для этой задачи используются дополнительный большой цилиндрический электрод с  $R_2 = 7.5$  см, согнутый из медной фольги. Этот электрод размещается в ванне симметрично относительно левого малого электрода и фиксируется с помощью 3-х небольших штырьков, закрепленных на масштабной сетке (правый малый электрод в этом упражнении не используется).

2. Соединить приборы и электроды согласно схеме, приведенной на рис. 5. При этом черные провода, идущие от генератора и вольтметра, необходимо подключить к большому цилиндрическому электроду, потенциал которого будет равен нулю, так как приборы заземлены.

3. Измерить разность потенциалов  $\Delta\varphi_0 = U_0$  между электродами и определить параметр  $U_C$  в рабочих формулах (21) и (22). Для этого щупом на красном проводе коснуться в трех точках положительного электрода (предварительно снять с него наконечник), соединенного с генератором красным проводом. Записать значения  $U_0$  и  $U_C$  во вторую строчку Таблицы 1, а также в строки с  $r_i = -0.4, 0, 0.4$ .

4. На измерительный щуп с красным проводом **надеть специальный наконечник**, который фиксирует положение щупа в ванне по высоте и позволяет измерять потенциал вдоль линии, соединяющей середины электродов. Так как распределение потенциала по глубине ванны может сильно меняться, **применение наконечника при измерении обязательно**. При измерении потенциала в выбранной точке ванны щуп надо располагать перпендикулярно к поверхности воды, и перед считыванием показаний вольтметра выждать 2 - 3 секунды, чтобы установились показания на световом табло прибора.

5. Измерить значение потенциала вдоль радиуса  $r$  по оси  $OX$  (рис. 5) для значений  $r$  в интервале  $1.0 \leq r \leq 7.0$  и  $8.0 \leq r \leq 10.0$  с шагом  $\Delta r = 0.5$  см и занести данные в 3-ю колонку Таблицы 1 (точки, для которых размеры шупа не позволяют провести измерения, остаются пустыми). Значения  $r = 0$  и  $r = 7.5$  отвечают положительному и отрицательному (заземленный черный провод) электродам, соответственно (рис. 5).

6. Провести измерения потенциала на окружности, нанесенной на масштабную сетку, с шагом  $\Delta l \sim 1.0$  см ( $\sim 5 - 6$  точек сверху и снизу от оси  $OX$ ) и занести в 5-ю колонку Таблицы 1.

7. (по указанию преподавателя) измерить значение потенциала вдоль радиуса  $r$  по оси  $OY$  (рис. 5) для значений  $r$  в интервалах  $1.0 \leq r \leq 7.0$  и  $8.0 \leq r \leq 10.0$  с шагом  $\Delta r = 0.5$  см.

**Таблица 1**

**Значения потенциала  $U(r)$ ,  $U(l)$  и напряженности  $E_r(r)$ ,  $E_l(l)$  вдоль радиуса и по окружности**

		$R_1 = 0.4$ см		$R_2 = 7.5$ см			
		$U_0 = \Delta\varphi_0 = \dots$ В		$U_C = U_0/\ln(R_2/R_1) = \dots$ В			
		эксперимент				теория	
		по радиусу		по окружности		по радиусу	
$i$	$r_i (l_i)$ , см	$U_i$ , В	$E_{r,i} = -\Delta U_i / \Delta r_i$ , В/см	$U_i$ , В	$E_{l,i} = -\Delta U_i / \Delta l_i$ , В/см	$U^{теор}$ , В	$E_r^{теор}$ , В/см
1	-0.4						
2	0						
3	0.4						
4	1.0						
5	1.5						
6	2.0						
7	2.5						
...	...						
$n$	7.0						
$n + 1$	8.0						
$n + 2$	8.5						
...	10						



## Упражнение 2

### Измерение распределения потенциала в цилиндрическом конденсаторе с параметрами $R_{1a} = 2.5$ см и $R_2 = 7.5$ см

1. В этом упражнении используются дополнительный цилиндрический электрод с радиусом  $R_{1a} = 2.5$  см, согнутый из медной фольги. Этот электрод размещается в ванне симметрично относительно левого малого и большого цилиндрических электродов и также фиксируется с помощью 3-х небольших штырьков, закрепленных на масштабной сетке.

2. Соединить провод, идущий от этого дополнительного электрода, с красными проводами от генератора и вольтметра. Таким образом, этот электрод, также как и малый центральный, будет иметь максимальный потенциал  $U_0$  (рис. 5). Подключение остальных электродов не меняется.

3. Провести измерения согласно пунктам 3 - 5 из Упражнения 1 и занести данные в Таблицу 2 (точки, для которых размеры щупа не позволяют провести измерения, остаются пустыми).

### Таблица 2

Значения потенциала  $U(r)$  и напряженности  $E_r(r)$  вдоль радиуса

		$R_{1a} = 2.5$ см	$R_2 = 7.5$ см		
		$U_0 = \Delta\varphi_0 = \dots$ В $U_C = U_0/\ln(R_2/R_1) = \dots$ В			
		эксперимент		теория	
		по радиусу		по радиусу	
$i$	$r_i$ , см	$U_i$ , В	$E_{r,i} = -\Delta U_i/\Delta r_i$	$U^{теор}$ , В	$E_r^{теор}$ , В/см
1	-0.4				
2	0				
3	0.4				
4	1.0				
7	2.5				
...	...				
$n$	7.0				
$n + 1$	8.0				
$n + 2$	8.5				



### Упражнение 3

#### Измерение распределения потенциала для “модельной системы” из двух одноименно заряженных цилиндров в заземленной оболочке

1. В этом упражнении большой цилиндрический электрод из фольги с радиусом  $R_2 = 7.5$  см заменяется на электрод большего радиуса  $R_S = 10$  см (экран), который размещается в ванне симметрично относительно средней точки для двух малых цилиндрических электродов, и фиксируется с помощью 3-х небольших штырьков, закрепленных на масштабной сетке.

2. Провод от большого цилиндрического электрода подключается к черным проводам, идущим от генератора и вольтметра (заземляется). Провода, идущие от двух малых цилиндрических электродов, соединяются с красными проводами от генератора и вольтметра. Таким образом, оба малых электрода будут иметь максимальный потенциал  $U_1 = U_2 = U_e$  относительно экрана (рис. 5).

3. Провести измерения согласно пунктам 3 - 5 из Упражнения 1 и занести данные в Таблицу 3 (точки, для которых размеры щупа не позволяют провести измерения, остаются пустыми).

4. По указанию преподавателя можно провести дополнительно измерения вдоль оси  $OY'$ , проходящей параллельно оси  $OY$  через центр системы, и занести данные в Таблицу 3, увеличив число колонок.

**Таблица 3**

**Значения потенциала  $U(x)$  и напряженности  $E_x(x)$  вдоль оси  $OX$  для “модельной системы”**

$R_1 = 0.4$ см; $R_S = 10$ см; $l = 8$ см					
$U_e = \dots$ В; $U_C = U_e / \ln(R_1 l / R_S (R_S - l)) = \dots$ В					
		эксперимент		теория	
		по оси $OX$		по оси $OX$	
$i$	$x_i$ , см	$U_i$ , В	$E_{x,i} = -\Delta U_i / \Delta x_i$ , В/см	$U^{теор}$ , В	$E_x^{теор}$ , В/см
1	-0.4				
2	0				
3	0.4				

4	1.0				
5	1.5				
6	2.0				
7	2.5				
...	...				
$n$	9.5				
$n + 1$	10.5				
$n + 2$	11				

#### Упражнение 4

##### Построение эквипотенциальных поверхностей (линий) поля “модельной системы”

1. По указанию преподавателя можно использовать один из двух способов регистрации измеренных данных: а) на графике на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1 (отметив на бумаге расположение электродов) или б) в Таблице 4 (этот способ предпочтительнее).

2. Для данной системы имеется два типа эквипотенциальных поверхностей/линий (см. Рис. 7) в зависимости от величины потенциала  $U_n$ . Для больших  $U_n$  линии охватывают отдельно каждый из двух электродов. При меньших значениях  $U_n$  линии охватывают одновременно оба электрода. Выбрать два значения потенциала  $U_1 \sim U_e/2$  и  $U_1 \sim U_e/4$ , соответствующих разным типам линий, для которых процедура построения немного отличается (записать во вторую строчку Таблицы 4). Для каждого значения потенциала  $U_n$  найти еще 6 - 7 точек с таким же значением потенциала в одной четверти поля между электродами и записать данные в Таблицу 4.

3. Для эквипотенциальных линий первого типа (с большим  $U_n$ ) лучше использовать следующую процедуру. Сначала найти точки, соответствующие потенциалу  $U_n$ , для  $y = 0$  слева и справа от левого электрода ( $x_{min}, 0$ ) и ( $x_{max}, 0$ ) и для  $x = 0$  с  $y_{max}$  (максимальная координата  $y_{max}$ ). Между точками ( $x_{min}, 0$ ) и ( $0, y_{max}$ ) найти еще по 3-и точки слева (и затем справа) от электрода с искомым потенциалом  $U_n$ .

4. Для эквипотенциальных линий второго типа (с меньшим  $U_n$ ) рекомендуется использовать другую процедуру (см. Рис. 7). Сначала найти точку, соответствующую потенциалу  $U_n$ , для  $x = 4$  (в центре системе) с  $\sim y_{max}$  (максимальная координата  $y_{max}$ ). Затем смещая щуп каждый раз на  $\Delta x = 1 - 0.5$  см влево на линию с фиксированным значением  $x_i$  (придерживаясь значений  $x_i$  из Таблицы 4) медленно перемещают его

вверх/вниз до тех пор, пока показание вольтметра не будет соответствовать значению потенциала  $U_n$ . Измеренное значение  $y_i$  записать в Таблицу 4 (или нанести на график на миллиметровой сетке и указать рядом значение  $U_n$ ). Повторить последовательно процедуру для других значений  $x_i$  из Таблицы 4, записывая значения  $y_i$  для каждого  $x_i$  в Таблицу 4. Для  $x < 0$  лучше двигаться мелкими шагами  $\Delta y = 1 - 0.5$  см по координате  $y$  и искать координату  $x_i$ . Учитывая симметрию распределения поля (зарядов) достаточно провести измерения и построение только для области значений  $x < l/2$  и  $0 < y < R_{2a}$

**Таблица 4**

**Значения координат  $(x_i, y_i)$  на линиях равного потенциала  $U_n$  поля “модельной системы”**

$R_1 = 0.4$ см; $R_S = 10$ см; $l = 8$ см				
$U_e = \dots$ В; $U_C = U_e / \ln(R_1 l / R_S (R_S - l)) = \dots$ В				
	$U_1 = \dots$ В		$U_2 = \dots$ В	
<i>i</i>	$x_i$ , см	$y_i$ , см	$x_i$ , см	$y_i$ , см
<b>0</b>	$x_{min}$	<b>0</b>	<b>4</b>	$y_{max}$
1	...	...	3	...
2	...	...	2	...
3	...	...	1.5	...
4	<b>0</b>	$y_{max}$	1	...
5	...	...	0.5	...
6	...	...	0	$\sim y_{max}$
7	...	...	...	$\sim y_{max} - 0.5$
8	$x_{max}$	<b>0</b>	...	$\sim y_{max} - 1$
9	...	...	...	...

## Обработка результатов

### Упражнение 1

1. Используя связь между потенциалом и вектором напряженности (формула (10)), из измеренного распределения потенциала  $U(r)$  вдоль радиуса  $r$  в Таблице 1 рассчитать проекцию  $E_r(r) = -(U_{i+1} - U_i) / (r_{i+1} - r_i)$ .

2. По формулам (21) и (22) рассчитать теоретическое распределение потенциала  $U^{теор}(r)$  и проекции вектора напряженности  $E_r^{теор}(r)$  вдоль радиуса конденсатора. При расчете использовать параметры ванны

$R_1 = 0.4$  см,  $R_2 = 7.5$  см и определенные значения потенциалов  $U_0$  и  $U_C$  из Таблицы 1.

3. Построить на одном графике измеренные  $U(r)$  и рассчитанные  $U^{теор}(r)$  зависимости потенциала вдоль радиуса и сравнить эти зависимости.

4. Построить на одном графике экспериментальные  $E_r(r)$  и рассчитанные  $E_r^{теор}(r)$  зависимости проекции вектора напряженности вдоль радиуса и сравнить эти зависимости.

5. Для выполнения однотипных расчетов зависимостей потенциала  $U^{теор}(r)$  и проекции вектора напряженности  $E_r^{теор}(r)$  вдоль радиуса и построения графиков рекомендуется использовать **готовую таблицу обработки результатов** (файл **Task\_308\_res.xls**), которая инсталлирована на рабочих компьютерах в лаборатории практикума. Правила пользования **Таблицей обработки** задачи практикума описаны в **Приложении 1** настоящего описания.

### Упражнение 2

1. Результаты измерения в Упражнении 2 обрабатываются аналогично Упражнению 1. При расчете теоретического распределения потенциала  $U^{теор}(r)$  и проекции вектора напряженности  $E_r^{теор}(r)$  вдоль радиуса конденсатора по формулам (21) и (22) использовать параметры ванны  $R_{1a} = 2.5$  см и  $R_2 = 7.5$  см.

2. Построить на одном графике измеренные  $U(r)$  и рассчитанные  $U^{теор}(r)$  зависимости потенциала вдоль радиуса для двух конденсаторов с  $R_1 = 0.4$  см и  $R_{1a} = 2.5$  см и сравнить эти зависимости.

### Упражнение 3

1. Распределение потенциала  $U(x)$  и проекцию  $E_x(x)$  вектора напряженности вдоль оси  $OX$  “модельной системы” легко получить по принципу суперпозиции, используя формулы (20) для заряженного цилиндра. Распределение результирующего потенциала  $\varphi(x)$  системы вдоль оси  $OX$  в областях вне цилиндров и потенциалы  $U_e$  на электродах относительно экрана имеют вид (вывод формул приведен в Приложении 1 к задаче; формулы П2, П3).

$$\varphi(x) = -U_C \left[ \ln \left| \frac{x}{R_S} \right| + \ln \left| \frac{x-l}{R_S-l} \right| \right], \quad (23a)$$

$$U_e = \varphi(0) = \varphi(l) = -U_C \ln \frac{R_1 l}{R_S (R_S - l)} . \quad (236)$$

где  $R_S$  – координата правой точки экрана. Именно это распределение потенциала экспериментально исследуется в Упражнении 3.

2. По формуле (23а) рассчитать распределение потенциала  $U^{meop}(x)$  и проекции вектора напряженности  $E_x^{meop}(x)$  вдоль оси  $OX$  “модельной системы”. При расчете использовать параметры ванны  $R_1 = 0.4$  см,  $l = 8.0$  см и определенные значения потенциалов  $U_e$  и  $U_C$  из Таблицы 3.

3. Построить на одном графике измеренные  $U(x)$  и рассчитанные  $U^{meop}(x)$  зависимости потенциала вдоль оси  $OX$  “модельной системы” и сравнить эти зависимости.

#### Упражнение 4

1а. По данным  $(x_i, y_i)$  из Таблицы 4 построить эквипотенциальные поверхности/линии для измеренных значений потенциала  $U_n$  (использовать электронные таблицы типа *Microsoft Excel* или *LibreOffice Calc*). Построить линии напряженности, используя связь между вектором напряженности и эквипотенциальной поверхностью.

1б. Если используется регистрация данных на миллиметровой бумаге, соединить на графике найденные точки с одинаковым значением потенциала плавной кривой и по ним построить линии напряженности.

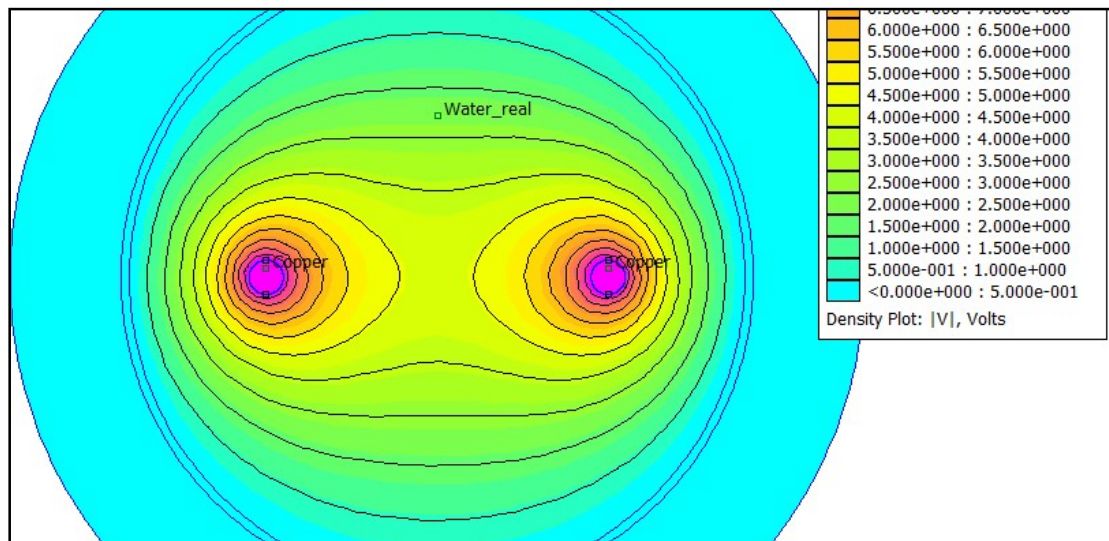


Рис. 7. Результаты численного расчета линий равного потенциала для исследуемой “модельной системы”

2. Теоретический расчет эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности в общем случае даже для простых систем типа исследуемой “модельной системы” достаточно трудоемок и проводится чаще всего с использованием программ численного расчета. Результаты такого расчета для исследуемой “модельной системы” приведены на рис. 7.

3. Сравнить измеренные и рассчитанные эквипотенциальные линии. Проанализировать результаты.

### Основные итоги работы

В результате выполнения работы должны быть получены зависимости потенциала  $U(r)$  и проекции вектора напряженности  $E_r(r)$  вдоль радиуса для двух цилиндрических конденсаторов. Для "модельной системы" должны быть получены зависимости потенциала  $U(x)$ , проекции вектора напряженности  $E_x(x)$  вдоль оси  $OX$  и эквипотенциальные поверхности/линии. Для всех исследуемых систем должно быть проверено соответствие экспериментальных данных и теории.

### Контрольные вопросы

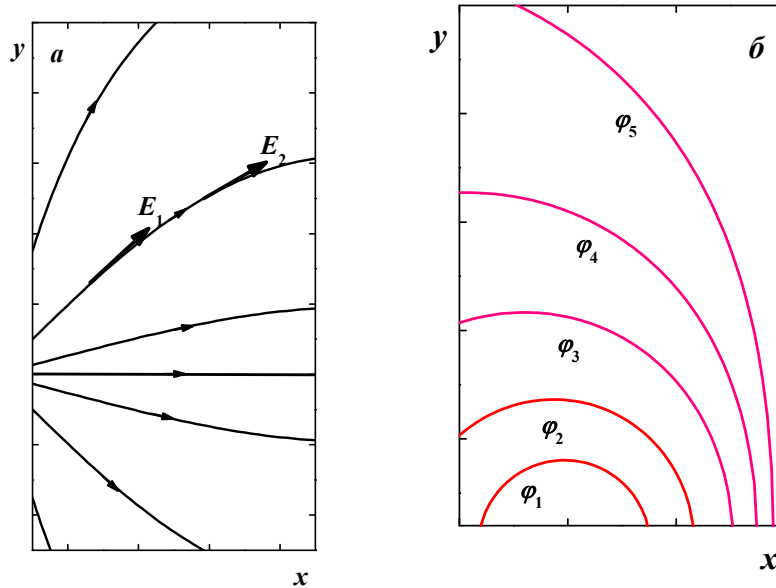
1. Напряженность электростатического поля, линии напряженности. Принцип суперпозиции для напряженности поля.

2. Потенциальная энергия и потенциал электростатического поля. Эквипотенциальные поверхности.

3. Интегральная и локальная (в заданной точке) связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля. Доказать, что линии напряженности поля в любой точке перпендикулярны соответствующим эквипотенциальным поверхностям.

4. Изобразить эквипотенциальные кривые для картины линий напряженности  $E$  электростатического поля, приведенной на рис. 8 а (указать направление вдоль линий поля, в котором потенциал возрастает). Изобразить линии напряженности  $E$  электростатического поля для приведенных на рис. 8 б эквипотенциальных кривых (указать направление вектора  $E$ ).

5. Распределение заряда на проводнике в электростатическом поле. Напряженность и потенциал поля внутри проводника.



**Рис. 8. Линии напряженности  $E$  (а) и эквипотенциальные поверхности/кривые  $\varphi_i$  (б) электростатического поля**

6. Нарисовать схему экспериментальной установки и объяснить порядок работы. Как обосновывается возможность замены экспериментального изучения электростатического поля изучением поля стационарного тока?

7. Какой вид имеют зависимости  $U(r)$  потенциала и  $E_r(r)$  проекции напряженности электрического поля в цилиндрическом конденсаторе.

8. Поток вектора напряженности электростатического поля. Теорема Гаусса для потока вектора напряженности. Используя теорему Гаусса получить зависимость  $E(r)$  вектора напряженности поля вдоль радиуса  $r$  для бесконечных равномерно заряженных по объему и по поверхности цилиндров.

9. Как экранировать некоторое пространство от поля зарядов, расположенных вне этого пространства?

## Литература

1. Белов Д.В. «Электродинамика и волновая оптика». Учебное пособие. Изд. Московского университета, 1994 г.

Часть I. Электродинамика.

§ 1. Понятие об электростатическом поле и электрическом заряде.

§ 2. Напряженность. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса.

§ 3. Потенциал.

§ 4. Проводник в электростатическом поле.

2. И. В. Савельев. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука. 1982.

Часть I. Электричество и магнетизм

§ 1. Электрический заряд

§ 2. Закон Кулона

§ 5. Электрическое поле. Напряженность поля

§ 6. Потенциал

§ 8. Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом

§ 13. Теорема Гаусса

§ 14. Вычисление полей с помощью теоремы Гаусса

§ 24. Равновесие зарядов на проводнике

§ 25. Проводник во внешнем электрическом поле

3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество. – 4-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.

Глава I. Электрическое поле

3. Закон Кулона. Принцип суперпозиции электростатических полей

5. Поток вектора и электростатическая теорема Гаусса. Применения теоремы Гаусса

11. Проводники в электрическом поле

17. Потенциальность электростатического поля

18. Электрический потенциал

19. Вычисление потенциала по напряженности поля

4. описание лабораторной работы на сайте кафедры:  
<https://condmatt.phys.msu.ru/practical-work/electricity/>



## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Расчет напряженности и потенциала для одного заряженного цилиндра легко распространить на систему из двух одноименно заряженных цилиндров – “модельную систему”. Как было показано (фор. (20)), распределение потенциала, создаваемого одним положительно заряженным цилиндром, в цилиндрической системе с началом координат на оси цилиндра имеет вид ( $U_C = \pi/2 \pi \varepsilon_0$ ; внутри цилиндра потенциал постоянен)

$$\varphi_1(r) = \int_r^{R_b} \frac{U_C}{r} dr = U_C \ln |\vec{r}| \Big|_r^{R_b} = -U_C \ln \frac{r}{R_b}, \quad |r| \geq R_1, \quad (\text{П1})$$

где начало отсчета потенциала выбирается на стенках ванны  $R_b$  (или на заземленном экране  $R_S$ ). Для второго заряженного цилиндра, ось которого смещена на вектор  $\vec{l} = \{l, 0, 0\}$  от начала координат системы, в формуле (П1) нужно заменить  $\ln|\vec{r}|$  на  $\ln|\vec{r}'| = \ln|\vec{r} - \vec{l}|$  (под знаком  $\ln|\vec{r} - \vec{l}|$  стоит модуль вектора). В формулу входит полярный радиус, который для двух указанных цилиндров выражается через декартовы координаты точки наблюдения в виде  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$  и  $r' = [(x - l)^2 + y^2]^{1/2}$ , соответственно.

Наиболее простые выражения напряженность и потенциал имеют вдоль оси  $OX$ , проходящей через оси цилиндров, перпендикулярно им (начало декартовой системы координат выбрано на левом электроде, при этом  $y = 0$ ). Распределение результирующего потенциала системы вдоль оси  $OX$  в областях вне цилиндров и потенциалы  $U_e$  на электродах относительно экрана имеют вид

$$\varphi(x) = \varphi_1(x) + \varphi_2(x) = -U_C \left[ \ln \left| \frac{x}{R_S} \right| + \ln \left| \frac{x-l}{R_S-l} \right| \right], \quad (\text{П2})$$

$$U_e = \varphi(0) = \varphi(l) = -U_C \ln \frac{R_1 l}{R_S (R_S - l)}. \quad (\text{П3})$$

где  $R_S$  – координата точки на экране, в которой выбирается ноль отсчета потенциала. Выражение для  $U_e$  используется для определения параметра  $U_C$  в этой геометрии. В упражнении 3 настоящей задачи экспериментально исследуется разность потенциалов (напряжение) точки с координатой  $x$  относительно экрана вдоль оси  $OX$ , описываемое формулой (П2).

Отметим, что для исследуемой “модельной системы” распределение заряда на экране будет неоднородным (разная плотность заряда в точках экрана на осях  $OX$  и  $OY$ ), что не учитывается в нашем рассмотрении. Поэтому полученные формулы не очень хорошо работают вблизи экрана. Влияние неоднородности распределения заряда на экране будет тем меньше, чем больше отношение  $R_S/l$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Работа с готовой таблицей обработки Task\_308\_res.xls

Таблицы обработки результатов можно сделать самостоятельно, или использовать готовые файлы этих таблиц. Готовые файлы таблиц можно скачать с сайта кафедры <https://condmatt.phys.msu.ru/> и использовать на PC, на котором установлен *Microsoft Office 2019* или *LibreOffice 7* (русскоязычные или англоязычные версии). Для студентов, которые недостаточно хорошо знакомы с электронной таблицей *Microsoft Excel* *вначале следует прочитать методическое описание "Электронные таблицы обработки задач практикума"*, в котором описываются основные правила и особенности работы с электронными таблицами.

При использовании **готовой таблицы обработки результатов** к Задаче 308 практикума (файл **Task\_308\_res.xls**) следует придерживаться следующих рекомендаций.

- Каждое упражнение и график к нему в файле представлены на отдельном листе, который выбирается внизу экрана (Упражн.\_1\_2\_3\_4, График\_1, График\_1\_Е, График\_3, и др.).
- Константы, которые могут понадобиться при расчете, типа число  $\pi$ , электрическая постоянная  $\epsilon_0$  и др., приведены в начале листа в единицах системы СИ (см. ячейки B6, B7) и используются далее в формулах с указанием абсолютных адресов ячеек.
- Параметры ванны и эксперимента (например, для Упражн.\_1 -  $R_1, R_2, U_0 = \Delta\varphi_0$ ) вносятся в указанные ячейки на листе Упражн.\_1\_2\_3\_4 электронной таблицы.
- **Измеренные величины**, а также параметры системы, которые могут понадобиться при расчете, вводятся в **ячейки таблицы, выделенные красным цветом. Ячейки таблицы, содержащие формулы расчета, которые могут потребовать редактирования, выделены коричневым цветом. Остальные ячейки таблицы**, в которые заведены не требующие изменения формулы, **должны оставаться без изменения** (эти ячейки могут быть закрыты для записи).

Для выполнения расчетов и построения графиков необходимо

#### Упражнение 1.

I. Ввести **измеренные величины  $U_i$  для указанных в таблице значений  $r_i$**  непосредственно в единицах измерения В в ячейки D24 – D50 (неиспользуемые ячейки в конце должны оставаться пустыми)

II. Ввести **измеренные величины  $U_i$  для указанных в таблице значений  $\Delta_i$**  непосредственно в единицах измерения В в ячейки G24 – G47 (неиспользуемые ячейки в конце должны оставаться пустыми)

III. Электронная таблица путем численного дифференцирования рассчитывает проекции  $E_r = -(U_{i+1} - U_i)/(r_{i+1} - r_i)$  и  $E_l = -(U_{i+1} - U_i)/(l_{i+1} - rl_i)$  вектора напряженности

вдоль радиуса (оси  $OX$ ) и по касательной к окружности цилиндрического конденсатора ячейки (E25 – E50) и ячейки (H25 – H50), соответственно.

IV. В Упражнении 1 проводятся также теоретические расчеты потенциала цилиндрического конденсатора вдоль радиуса, которые сравниваются с результатами измерения из Таблицы\_1. Для расчета вначале нужно внести/проверить параметры ванны и эксперимента ( $R_1, R_2, U_0 = \Delta\varphi_0$ ) в указанные ячейки на этом листе электронной таблицы. В ячейках, выделенных коричневым цветом, будут представлены величины, необходимые для расчетов по формулам (21 и 22) из описания.

V. В ячейках K24 - K91 рассчитывается величина  $\ln(r/R_2)$ , пропорциональная (с точностью до множителя  $-U_C$ ) потенциалу  $\varphi$ , создаваемому в точке с радиус-вектором  $r_i$ . При вычислении теоретической разности потенциалов используется более мелкий шаг  $\Delta r = 0.2$  по координате, что повышает точность при численном дифференцировании  $\Delta U/\Delta r$ . Результирующие разность потенциалов  $U^{meop}(r) = \Delta\varphi(r)$  и проекция вектора напряженности  $E_r^{meop}$  приводятся в ячейках L24 - L91 и M25 - M91.

VI. Электронная таблица по данным  $(r_i, U_i)$  и  $(l_i, U_{l,i})$  построит экспериментальные кривые  $U_{экс}(r)$  разности потенциалов и проекции  $E_{r,экс}(r)$  вдоль радиуса конденсатора, которые можно видеть на листах График\_1 и График\_1\_Е, соответственно (сплошные символы). Электронная таблица по данным  $(r_i, U_i^{meop})$  и  $(r_i, E_{r,i}^{meop})$  построит теоретические кривые  $U_{meop}(r)$  разности потенциалов и  $E_{r,meop}(r)$  проекции вектора вдоль радиуса, которые можно видеть на листах График\_1 и График\_1\_Е (открытые символы). Подобрать масштабы по осям  $OX$  и  $OY$  на графиках График\_1 и График\_1\_Е, так чтобы кривые на графиках занимали не менее 80% площади рисунка и внести дополнительные пояснения к кривым.

VII. Для обработки результатов измерения в Упражнении 2 используются те же формулы на листе График\_1, в которых надо изменить  $R_1$  на  $R_{1a}$ .

VIII. Для обработки результатов измерения в Упражнении 3 можно использовать формулы на листе График\_1, в которые надо внести изменения в соответствии с формулами (23а, 23б).

После завершения расчетов следует **записать рассчитанные величины в таблицы в рабочей тетради**, оставив необходимое число значащих цифр в соответствии с теорией ошибок (можно распечатать и вклеить таблицы и графики в тетрадь).

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Краткая информация о настройке параметров используемых электроизмерительных приборов

##### Универсальный вольтметр GDM 78261 (фото)

(приводится только описание кнопок, которые используются для установки параметров)



Рис. 6. Общий вид вольтметра GDM 78261

Щупы подключаются так, как показано на фотографии: красный щуп - к гнезду **ВХОД/ВЫХОД U, R** для переменного напряжения  $\sim AC$ ; черный щуп - к заземленному гнезду

- Включить прибор кнопкой **СЕТЬ**
- Установить режим измерения переменного напряжения кнопкой **U~** (на дисплее горит **AC**)
- Установить моду быстрого измерения кнопкой **СКОРОСТЬ** (на дисплее горит **F**)
- Установить предел измерения **100 V** кнопками **ПРЕДЕЛЫ** (на дисплее горит **100 V** и отображается 3 знака измеряемого напряжения)
- Подключить фильтр (на дисплее горит **FILT**)

##### Генератор переменного напряжения AWG -4150 (фото)

(приводится только описание кнопок, которые используются для установки параметров)

1. Включить прибор нижней левой кнопкой

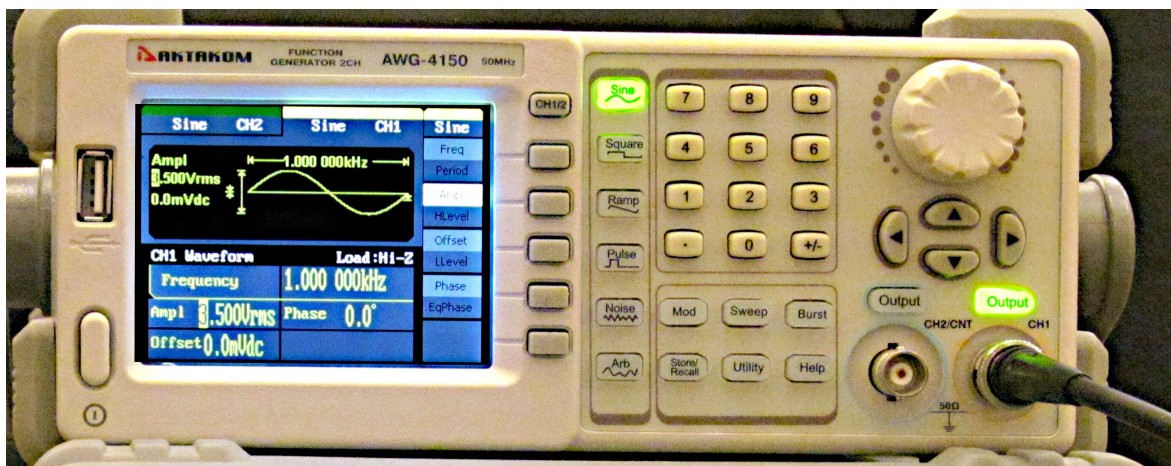
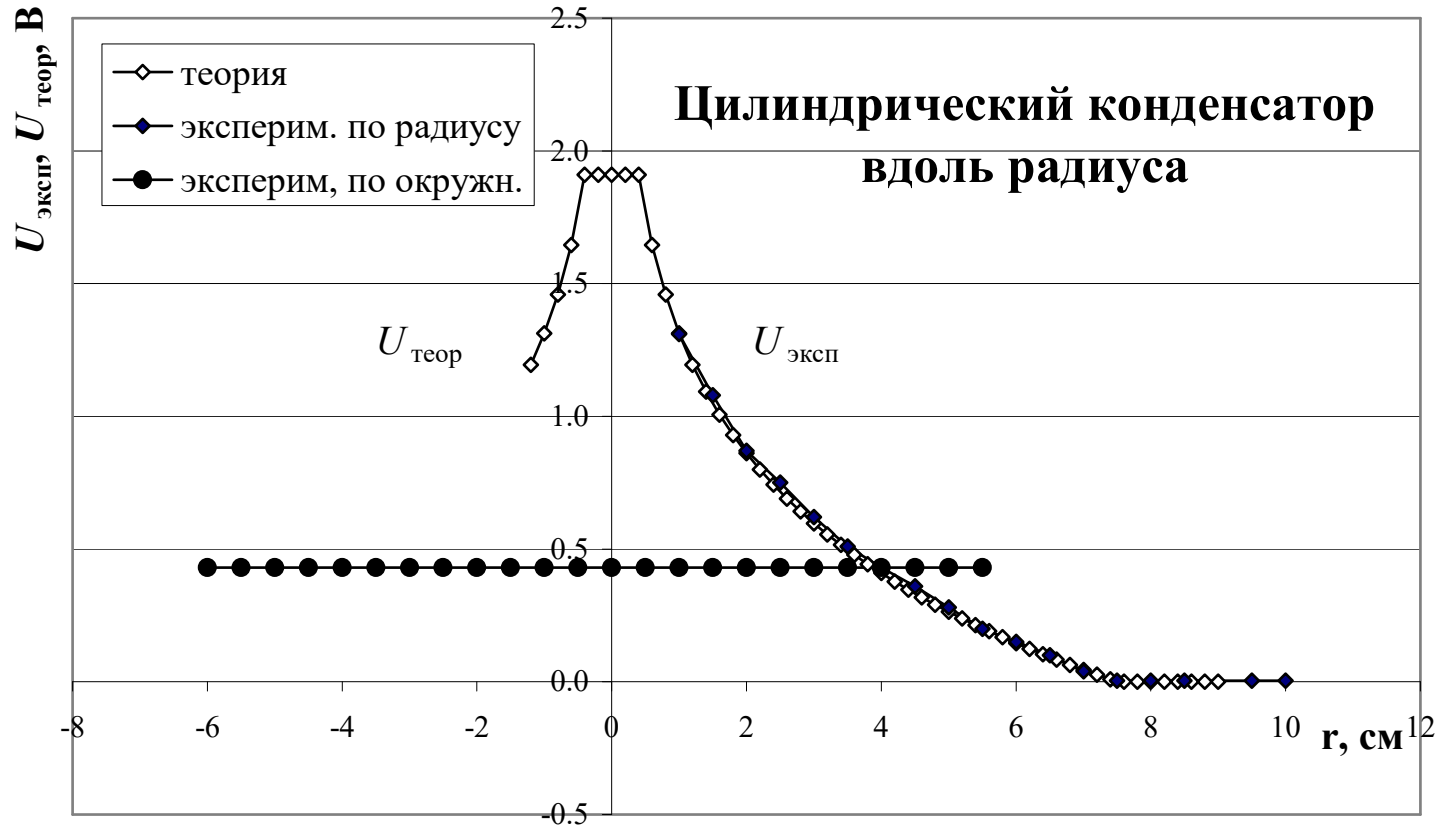


Рис. 7. Общий вид генератора AWG -4150

2. Выходной кабель подключен к каналу **CH1**
3. Устанавливаемый параметр индицируется в правой колонке на дисплее (соответствующий элемент горит) и выбирается соседней кнопкой. Изменение параметра производится стрелками вправо-влево или вверх-вниз и задается на цифровой клавиатуре (справа на передней панели)
4. Последовательно установить/проверить
  - кабель подключен к выходу канала **CH1** (см. фото))
  - используемый канал выхода – **CH1** (лампочка output горит)
  - форма сигнала – синусоидальная **Sine** (лампочка горит)
  - частота сигнала (Freq) - **1.000 000 KHz**
  - амплитуда сигнала (Ampl) – **2.5 – 3.5 Vrms** (root mean square – “эффективное” значение)
  - амплитуда сигнала (Ampl) – **2.5, 3.0** или **3.5 Vrms** по указанию преподавателя (root mean square – “эффективное” значение выбирается кнопкой, соседней с ячейкой в правой колонке на дисплее)
  - постоянная составляющая на выходе (Offset) **0.0mVdc** (постоянная составляющая сигнала отсутствует)



Контрольные данные для лаборанта  
(пробные измерения)



Контрольные данные для лаборанта  
(пробные измерения)

