

# ЭЛЕКТРОСТАТИКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО ГОУ ВПО ТГТУ

УДК 537.2(076.5)  
ББК В331я73-5  
Э455

Рецензент

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Прикладная геометрия и компьютерная графика» ГОУ ВПО ТГТУ  
*С.И. Лазарев*

Составители:

*В.Б. Вязовов,*  
*С.П. Кудрявцев,*  
*А.М. Подкаура*

Э455 Электростатика : лабораторные работы / сост. : В.Б. Вязовов, С.П. Кудрявцев, А.М. Подкаура. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 24 с. – 100 экз.

Предложены методические указания по выполнению лабораторных работ, включающие теорию изучаемого предмета, порядок выполнения, таблицы, расчётные формулы.

Предназначены для студентов 1 и 2 курсов всех специальностей и форм обучения инженерного профиля.

УДК 537.2(076.5)  
ББК В331я73-5

© Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический  
университет» (ГОУ ВПО ТГТУ), 2010  
Министерство образования и науки Российской Федерации

**Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Лабораторные работы  
по курсу общей физики  
для студентов 1 и 2 курсов всех специальностей и форм обучения  
инженерного профиля



---

Тамбов  
Издательство ГОУ ВПО ТГТУ  
2010

Учебное издание

# ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Лабораторные работы

Составители:

ВЯЗОВОВ Виктор Борисович,  
КУДРЯВЦЕВ Сергей Павлович,  
ПОДКАУРО Александр Михайлович

Редактор И.В. К а л и с т р а т о в а  
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Ф и л а т о в а

Подписано в печать 10.11.2010  
Формат 60 × 84/16. 1,39 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 548

Издательско-полиграфический центр ГОУ ВПО ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

# 1.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА МЕТОДОМ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

*Цель работы:* ознакомиться с принципом определения ёмкости конденсатора методом баллистического гальванометра, экспериментально проверить формулы, выражающие ёмкость конденсаторов при последовательном и параллельном соединении.

*Приборы и принадлежности:* установка для измерения ёмкости конденсатора, баллистический гальванометр, батарейка.

## Краткая теория и методические указания

Плоским конденсатором называется система, состоящая из двух одинаковых параллельных металлических пластин, расположенных на близком (по сравнению с их линейными размерами) расстоянии одна от другой. Между пластинами находится диэлектрик (при его отсутствии конденсатор называется воздушным, или вакуумным). На пластинах (обкладках) заряженного конденсатора появляются одинаковые по модулю, противоположные по знаку заряды. Электрическое поле в этом случае локализуется внутри конденсатора, а краевыми эффектами можно пренебречь.

Ёмкостью конденсатора  $C$  называется физическая величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности между взятыми по модулю зарядом одной из пластин и напряжением между ними:

$$q = CU.$$

В системе СИ ёмкость измеряется в фарадах.

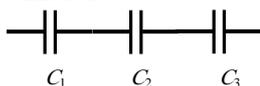
Для плоского конденсатора формула ёмкости имеет вид:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

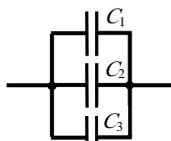
где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная ( $\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $S$  – площадь пластины;  $d$  – расстояние между пластинами.

Соединения конденсаторов бывают:

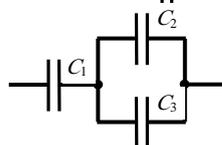
1) последовательными



2) параллельными



3) смешанными



Разумеется, число конденсаторов в батареях может быть и другим.

При последовательном соединении конденсаторов заряды на обкладках одинаковые ( $q_1 = q_2 = q_3 = q$ ), общее напряжение равно сумме напряжений ( $U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3$ ), а ёмкость всей батареи рассчитывается по формуле:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \quad (1)$$

При параллельном соединении конденсаторов заряд на обкладках батареи равен сумме зарядов ( $q_{\text{общ}} = q_1 + q_2 + q_3$ ), напряжения одинаковые ( $U_1 = U_2 = U_3 = U$ ), а ёмкость всей батареи рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3. \quad (2)$$

Вот эти две формулы (1) и (2) для случая двух конденсаторов и подлежат экспериментальной проверке в данной работе. Чтобы осуществить проверку, нужно измерить отдельно ёмкость каждого конденсатора, а затем, измерив ёмкости батарей при последовательном и параллельном соединении конденсаторов, убедиться в справедливости формул.

Для измерения ёмкости конденсатора существуют различные способы. Можно, например, включить конденсатор в колебательный контур и, зная величину индуктивности и измеряя резонансную частоту, рассчитать величину ёмкости. В данной работе используется метод баллистического гальванометра – прибора, измеряющего протекший через него заряд. Всякое измерение есть сравнение одной величины с другой (нужно только определиться, по какому признаку сравнивать). А идея очень простая: есть конденсатор с известной ёмкостью  $C_0$  и конденсатор с неизвестной ёмкостью  $C$ . Заряжая их до одного и того же напряжения и разряжая потом через баллистический гальванометр, можно измерить заряды обоих конденсаторов и легко рассчитать величину  $C$ :

$$q = CU, \quad q_0 = C_0 U, \quad C = C_0 \frac{q}{q_0}.$$

Особенность конструкции баллистического гальванометра состоит в том, что его рамка, получив толчок от кратковременного протекания тока, отклоняется на некоторый угол  $\alpha$ , величина которого связана с протекшим зарядом.

Световой «зайчик», отражённый от зеркальца, укрепленного на рамке, высвечивает на шкале гальванометра число делений, прямо пропорциональное протекшему заряду:

$$q = kn,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности (постоянная гальванометра).

Таким образом, измеряя отброс «зайчика»  $n_0$  на шкале гальванометра для конденсатора с известной ёмкостью  $C_0$  (значение этой величины указано на установке) и отброс «зайчика»  $n$  для конденсатора с неизвестной ёмкостью  $C$ , можно рассчитать величину  $C$ :

$$C = C_0 \frac{n}{n_0}. \quad (3)$$

Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

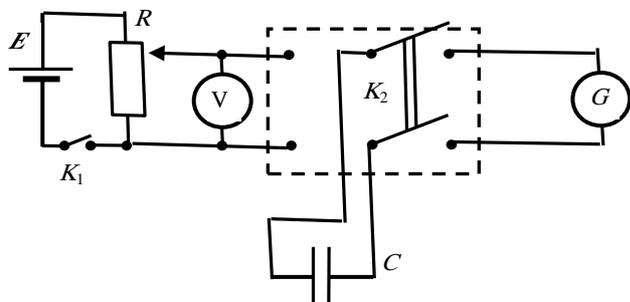


Рис. 1

При замыкании ключа  $K_1$  напряжение  $U$ , снимаемое с потенциометра  $R$ , подаётся на левые клеммы двойного ключа  $K_2$ . Вольтметр  $V$  лишь фиксирует наличие напряжения. К правым клеммам этого ключа подсоединён баллистический гальванометр  $G$ . Эталонный и исследуемый конденсаторы поочередно подключаются на средние клеммы ключа. При перекидывании ключа  $K_2$  влево конденсатор заряжается до напряжения  $U$ , а затем, при перекидывании ключа  $K_2$  вправо конденсатор разряжается через баллистический гальванометр.

Баллистический гальванометр представляет собой разновидность гальванометра магнитоэлектрической системы и отличается тем, что момент инерции его подвижной системы искусственно увеличен.

### Порядок выполнения работы

1. Включите в розетку сети 220 В штепсель питания осветителя гальванометра, убедитесь в положении светового «зайчика» на нулевом делении шкалы прибора.
2. Подсоедините батарейку в качестве источника ЭДС к соответствующим клеммам установки и замкните ключ  $K_1$ . Вольтметр  $V$  должен показать наличие напряжения.
3. Соедините конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  параллельно и подключите их к средним клеммам ключа  $K_2$ .
4. Зарядите конденсаторы, переведя ключ  $K_2$  в левое положение.
5. Разрядите конденсаторы на баллистический гальванометр, переведя ключ  $K_2$  в правое положение, и зафиксируйте максимальное отклонение светового «зайчика».
6. С помощью потенциометра  $R$  установите такое напряжение, чтобы отклонение «зайчика» при параллельном соединении конденсаторов было наибольшим («на всю шкалу»). Установленное напряжение во всех дальнейших опытах остаётся постоянным.
7. Проведите пять опытов с *параллельно* соединёнными конденсаторами и результаты занесите в табл. 1. Ознакомьтесь с ходом выполнения работы и описанием установки по методическим указаниям.
2. Ключом подсоедините установку к источнику питания, установив напряжение примерно 1 В.
3. Подсоедините конденсатор ёмкости  $C_0$  и разрядите его на баллистический гальванометр, перебросив ключ  $K_2$  вправо, зафиксируйте отклонение светового «зайчика» на баллистическом гальванометре. Результаты измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	$n_{1i}$ (дел)	$\Delta n_{1i}$	$\Delta n_{1i}^2$	$S$	$\Delta n_1$	$E, \%$
1						
2						
3						
4						
5						
	$\bar{n}_1$		$\sum \Delta n_{1i}^2$			

Расчёт абсолютной и относительной погрешности измерений известного конденсатора (табл. 1):

а) рассчитайте среднюю величину отклонений «зайчика»  $\bar{n}_1$  :

$$\bar{n}_1 = \frac{\sum n_{1i}}{5};$$

б) рассчитайте абсолютные погрешности отдельных измерений

$$\Delta n_{11} = |\bar{n}_1 - n_{11}|; \Delta n_{12} = |\bar{n}_1 - n_{12}|; \Delta n_{13} = |\bar{n}_1 - n_{13}|; \Delta n_{14} = |\bar{n}_1 - n_{14}|; \Delta n_{15} = |\bar{n}_1 - n_{15}|;$$

в) рассчитайте квадраты абсолютных погрешностей отдельных измерений  $\Delta n_{21}^2; \Delta n_{22}^2; \Delta n_{23}^2; \Delta n_{24}^2; \Delta n_{25}^2$ ;

г) рассчитайте среднюю квадратичную погрешность  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta n_{1i}^2}{n(n-1)}}, \text{ где } n - \text{ число измерений};$$

д) рассчитайте абсолютную погрешность  $\Delta n_1$  по методу Стьюдента.

Абсолютная погрешность определяется произведением средней квадратичной погрешности  $S$  на коэффициент Стьюдента  $t_{n,w}$ . Для пяти измерений с надёжностью  $W = 0,95$  коэффициент Стьюдента  $t_{n,w} = 2,8$

$$\Delta n_1 = t_{n,w} S = 2,8 S;$$

е) рассчитайте относительную погрешность  $E$ :  $E = \frac{\Delta n_1}{n_1} \cdot 100\%$ .

4. Отсоедините конденсатор  $C_0$  и вместо него подсоедините конденсатор  $C_{x1}$  с неизвестной ёмкостью. Повторите операции п. 2 и 3 и значения  $n_2$  занесите в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	$n_{2i}$ (дел)	$\Delta n_{2i}$	$\Delta n_{2i}^2$	$S_p$	$\Delta n_2$	$E, \%$
1						
2						
3						
4						
5						
	$\bar{n}_2$		$\sum \Delta n_{2i}^2$			

**Расчёт абсолютной и относительной погрешностей измерений и определение величины электроёмкости первого неизвестного конденсатора (табл. 2):**

а) рассчитайте среднюю величину отклонения «зайчика»  $\bar{n}_2$  :

$$\bar{n}_2 = \frac{\sum n_{2i}}{5};$$

б) рассчитайте абсолютные погрешности отдельных измерений

$$\Delta n_{21} = |\bar{n}_2 - n_{21}|; \Delta n_{22} = |\bar{n}_2 - n_{22}|; \Delta n_{23} = |\bar{n}_2 - n_{23}|; \Delta n_{24} = |\bar{n}_2 - n_{24}|; \Delta n_{25} = |\bar{n}_2 - n_{25}|;$$

в) рассчитайте квадраты абсолютных погрешностей отдельных измерений:  $\Delta n_{21}^2; \Delta n_{22}^2; \Delta n_{23}^2; \Delta n_{24}^2; \Delta n_{25}^2$ ;

г) рассчитайте среднюю квадратичную погрешность  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta n_{2i}^2}{n(n-1)}};$$

д) рассчитайте абсолютную погрешность  $\Delta n_2$  :  $\Delta n_2 = t_{n,w} S = 2,8 S$ ;

е) по формуле (1) рассчитайте среднее значение ёмкости  $C_{x1}$ :

$$C_{x1} = C_0 \frac{\bar{n}_2}{n_1};$$

ж) рассчитайте относительную ошибку  $E$  косвенного измерения электроёмкости неизвестного конденсатора  $C_{x1}$  и занесите в табл. 2:

$$E = \frac{\Delta C_{x1}}{C_{x1}} = \frac{\Delta C_0}{C_0} + \frac{\Delta n_2}{\bar{n}_2} + \frac{\Delta n_1}{n_1}, \text{ где } \Delta C_0 = 0,05 \text{ мкФ};$$

з) абсолютную погрешность  $\Delta C_{x1}$  рассчитайте по формуле:

$$\Delta C_{x1} = E C_{x1};$$

и) окончательный результат запишите в виде:

$$C_{x1} = \bar{C}_{x1} \pm \Delta C_{x1} = \quad \pm \quad .$$

5. Отсоедините конденсатор  $C_{x1}$  и вместо него подсоедините конденсатор  $C_{x2}$  с неизвестной электроёмкостью. Повторите операции п. 2, 3 и значения  $n_3$  занесите в табл. 3.

№ п/п	$n_{3i}$ (дел)	$\Delta n_{3i}$	$\Delta n_{3i}^2$	$S$	$\Delta n_3$	$E, \%$
1						
2						
3						
4						
5						
	$\overline{n_3}$		$\sum \Delta n_{3i}^2$			

**Расчёт абсолютной и относительной погрешностей измерений и определение величины электроёмкости второго неизвестного конденсатора** (табл. 3):

Аналогично расчёту для ёмкости конденсатора  $C_{x1}$  проведите все расчёты пунктов от а) до е) для конденсатора  $C_{x2}$  и заполните табл. 3.

а) по формуле (1) рассчитайте среднее значение ёмкости  $C_{x2}$ :

$$C_{x2} = C_0 \frac{n_3}{n_1};$$

б) рассчитайте относительную ошибку  $E$  косвенного измерения электроёмкости неизвестного конденсатора  $C_{x2}$  и занесите в табл. 3:

$$E = \frac{\Delta C_{x2}}{C_{x2}} = \frac{\Delta C_0}{C_0} + \frac{\Delta n_3}{n_3} + \frac{\Delta n_1}{n_1}, \text{ где } \Delta C_0 = 0,05 \text{ мкФ};$$

в) абсолютную погрешность  $\Delta C_{x2}$  рассчитайте по формуле:

$$\Delta C_{x2} = E \overline{C_{x2}};$$

г) окончательный результат запишите в виде:

$$C_{x2} = \overline{C_{x2}} \pm \Delta C_{x2}.$$

#### Контрольные вопросы

1. Что такое конденсатор? Какие бывают конденсаторы?
2. Что называется ёмкостью конденсатора? В чём она измеряется?
3. Напишите формулу ёмкости плоского конденсатора.
4. Какую роль играет диэлектрик в конденсаторе?
5. Для чего нужны конденсаторы? Где они используются?
6. Как ведут себя заряды, напряжения и ёмкости батарей при параллельном и последовательном соединении конденсаторов?
7. Какой наибольший заряд можно поместить на пластины конденсатора? Что нужно знать для ответа на этот вопрос?
8. Почему напряжение на пластинах заряженного конденсатора нельзя просто измерить с помощью обычного вольтметра?
9. На чём основан используемый в данной работе метод измерения ёмкости конденсатора?
10. Изобразите наибольшее возможное число *различных* способов соединения четырёх одинаковых конденсаторов.
11. Имеются три одинаковых конденсатора. Как их нужно соединить, чтобы:
  - а) заряд на обкладках батареи был наибольшим;
  - б) напряжение на батарее было наибольшим?
12. Каким образом можно повысить точность измерения ёмкости конденсатора в данной работе?
13. Чем определяются предельные значения ёмкостей конденсаторов (наибольшее и наименьшее), которые могут быть измерены на данной установке? Можно ли расширить эти пределы?
14. Укажите названия и назначения отдельных элементов схемы.
15. Как изменится ёмкость плоского воздушного конденсатора, если его геометрические размеры увеличить в 10 раз?
16. Два одинаковых конденсатора соединены последовательно. Как изменится ёмкость этой батареи, если расстояние между пластинами одного конденсатора в два раза увеличить, а расстояние между пластинами другого конденсатора в два раза уменьшить?
17. Почему конденсаторы не используются в качестве источника энергии, например, в автомобилях?

#### Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – Т. 2. – С. 84 – 86.
2. Савельев, И.В. Курс физики / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 2. – С. 82 – 86.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М. : Лань, 2005, Т. 1.
4. Бондарев, Б.В. Курс общей физики / Б.В. Бондарев, Н.П. Калашников, Г.Г. Спирин. – М. : Высшая школа, 2003. – Т. 2. – С. 85 – 89.
5. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М. : Высшая школа, 1999. – С. 222 – 226.
6. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 2001. – С. 174 – 177.
7. Зисман Г.А. Курс общей физики / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – М. : Наука, 1967. – Т. 2. – С. 76 – 84.
8. Грабовский, Р.И. Курс физики / Р.И. Грабовский. – М. : Лань, 2004. – С. 112–113.

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ

**Цель работы:** ознакомиться с методом моделирования электростатического поля; провести измерения потенциалов и построить картину эквипотенциальных поверхностей; провести силовые линии.

**Приборы и принадлежности:** электролитическая ванна; пантограф; блок питания; вольтметр; миллиметровая бумага.

### Краткая теория и методические указания

Вся материя делится на вещество и поле. Существуют различные физические поля: гравитационное, электромагнитное, поле ядерных сил и др. Электростатическое поле создаётся зарядами и действует на заряды; оно характеризуется напряжённостью и потенциалом.

**Напряжённость** поля  $E$  называется векторная физическая величина, равная отношению силы  $F$ , действующей на заряд  $q$ , к величине этого заряда:

$$E = \frac{F}{q}.$$

В системе СИ напряжённость измеряется в В/м (или Н/Кл). Вблизи поверхности Земли, например, напряжённость электростатического поля составляет примерно 100 В/м.

**Потенциалом**  $\varphi$  называется скалярная физическая величина, равная отношению работы  $A$ , совершённой силами поля при перемещении заряда  $q$  из данной точки в бесконечность, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{A}{q}.$$

В системе СИ потенциал измеряется в В (или Дж/Кл). Потенциалы Земли и бесконечности принимаются равными нулю.

Связь между напряжённостью поля  $E$  и потенциалом  $\varphi$  выражается соотношениями:

$$E = -\text{grad } \varphi = -\left(i \frac{\partial \varphi}{\partial x} + j \frac{\partial \varphi}{\partial y} + k \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right),$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 (E dS).$$

В целях удобства представления электростатического поля, его наглядности, используют **силовые линии**. Силовая линия (с.л.) – это воображаемая линия, имеющая направление, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряжённости, а «густота» (число линий на единицу ортогональной к ним поверхности) численно равна модулю напряжённости.

С.л. обладают рядом свойств – они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных (или уходят в бесконечность); не могут пересекаться между собой. Примеры с.л. (сплошные линии) показаны на рис. 1.

Геометрическое место точек, обладающих одинаковым потенциалом, называется **эквипотенциальной поверхностью** (э.п.). Можно показать, что э.п. в точках пересечения ортогональны с.л. Это



Рис. 1

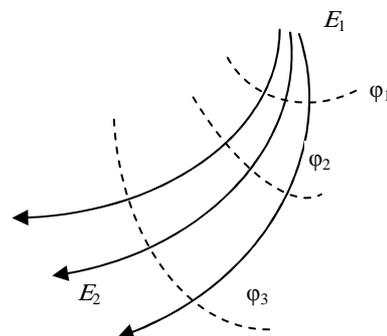


Рис. 2

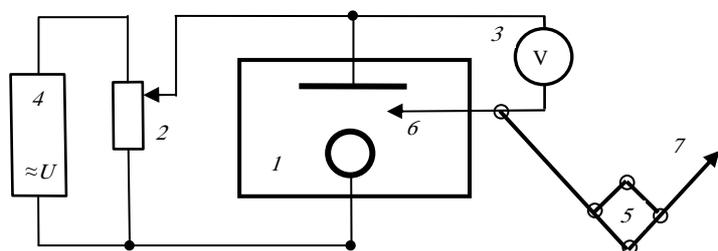
означает, что касательные к ним в этих точках взаимно перпендикулярны. При пересечении с плоскостью рисунка э.п. принимают вид линий. Они проводятся так, что разность потенциалов между ними одинакова. Примеры э.п. (пунктирные линии) показаны на рис. 1.

На рис. 2 изображены с.л. и э.п. некоторого участка неоднородного электростатического поля. Вдоль силовой линии потенциал убывает, т.е.  $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$ , а модуль напряжённости поля в верхней части рисунка больше, чем в нижней:  $E_1 > E_2$ .

Для расчёта напряжённости поля, созданного объектами с симметричным распределением заряда (однородно заряженные сферы и шары, цилиндры, плоскости и т.д.), используется теорема Гаусса и принцип суперпозиции. При отсутствии симметрии

теоретический расчёт напряжённости и потенциала может быть сопряжён со значительными трудностями. В таких случаях прибегают к экспериментальным методам исследования полей, одним из которых является метод *электролитической ванны*. Этот метод основан на подобии эквипотенциальных поверхностей в однородном электролите при протекании тока между двумя электродами и в вакууме при сохранении геометрического подобия электродов и при одинаковом распределении потенциала на них. Измерять же распределение потенциала в проводящей среде при протекании через неё тока значительно проще, чем в вакууме.

В настоящей работе используется установка, схема которой приведена на рис. 3.



**Рис. 3**

В состав установки входят:

- 1) ванна с электролитом и помещёнными в неё электродами;
- 2) потенциометр;
- 3) вольтметр;
- 4) блок питания;
- 5) пантограф;
- 6) зонд.

Блок питания 4 выдаёт переменное напряжение, часть которого через потенциометр 2

подаётся на электроды, положение которых в ванне можно изменять. На одном из двух плеч пантографа закреплён зонд 6, опущенный в электролит. На другом плече расположена специальная игла 7, с помощью которой можно делать отметки на бумаге. Напряжение между одним из электродов и зондом измеряется вольтметром.

Пантограф представляет собой простое устройство из четырёх шарнирно соединённых между собой реек. Движение иглы по бумаге повторяет в уменьшенном масштабе движение зонда в электролите. Если перемещать зонд вдоль линии равного потенциала (вольтметр при этом должен показывать одно и то же значение напряжения) и периодически делать иголкой отметки на бумаге, то получится изображение линии равного потенциала на бумаге. Можно построить несколько таких линий при разных напряжениях и с их помощью провести силовые линии, начинающиеся на одном электроде и оканчивающиеся на другом. В точках пересечения силовые линии и линии равного потенциала должны быть ортогональны. Так как сами электроды также являются поверхностями равного потенциала, то силовые линии ортогональны поверхностям электродов.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с ходом выполнения работы и описанием установки по методическим указаниям.
2. Закрепите в ванне электроды (форма электродов выбирается по указанию преподавателей).
3. На стол пантографа положите лист чистой бумаги формата А4.
4. Не включая установку в электрическую цепь, на бумагу с помощью пантографа нанесите расположение электродов.
5. Ключом *K* подайте переменное напряжение (10 ... 15 В) на электроды. Опустите в ванну зонд и, перемещая его вблизи одного из электродов, добейтесь разности потенциалов между электродами ванны и зондом определённой величины (например 2,5 В). Иголкой пантографа отметьте на бумаге эту точку.
6. Перемещением зонда найдите ряд точек, соответствующих этому значению потенциала.
7. Передвинув этот зонд дальше от электродов, получите новую серию точек с другим значением потенциала. Повторяя операции п. 5 постройте 5–6 серий точек с разными потенциалами. Разность потенциалов поля между соседними сериями точек должна оставаться одной и той же.
8. Замените один или два электрода (по указанию преподавателя) и аналогичным образом исследуйте электростатическое поле, построив новые серии точек одинакового потенциала.
9. Выньте лист бумаги из пантографа и перенесите изображения точек на двухмиллиметровую страницу рабочей тетради.
10. Соедините серии точек, построив карандашом эквипотенциальные линии.
11. По формуле  $E = -\text{grad}\varphi = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = -\frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{(l_2 - l_1)}$ , где  $(\varphi_2 - \varphi_1)$  приращение потенциала между соседними эквипотенциальными линиями, а  $(l_2 - l_1)$  кратчайшее расстояние между этими линиями, рассчитайте среднее значение напряжённости для всех линий электростатического поля.

### Расчёт напряжённостей:

$$E_1 = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}; E_2 = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}; E_3 = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}; E_4 = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}; \bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{4};$$

а) рассчитайте абсолютные погрешности отдельных измерений:

$$\Delta E_1 = |\bar{E} - E_1|; \Delta E_2 = |\bar{E} - E_2|; \Delta E_3 = |\bar{E} - E_3|; \Delta E_4 = |\bar{E} - E_4|;$$

б) рассчитайте абсолютную погрешность измерений  $\Delta E$ :

$$\Delta E = \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 + \Delta E_4}{4};$$

в) запишите окончательный результат в виде:

$$E = \bar{E} \pm \Delta E.$$

### Контрольные вопросы

1. Что такое электростатическое поле? Чем оно характеризуется? Как его обнаружить?
2. Дайте определение напряжённости поля  $E$  и потенциала  $\phi$ . В чём они измеряются?
3. Как связаны между собой  $E$  и  $\phi$  в однородном поле и в общем случае?
4. Что такое силовая линия? Перечислите свойства силовых линий.
5. Изобразите силовые линии и линии равного потенциала для однородного поля, поля точечного заряда и поля диполя.
6. Докажите ортогональность силовых линий и линий равного потенциала в точках пересечения.
7. Дайте определение потока вектора напряжённости и сформулируйте теорему Гаусса.
8. Приведите примеры применения теоремы Гаусса к расчёту напряжённости поля.
9. Напишите формулы дифференциальных операторов  $\text{div}$  и  $\text{grad}$ . Что они означают? К каким величинам применяются?
10. Чему равна дивергенция радиус-вектора  $r$ ?
11. Чему равна дивергенция градиента  $\text{div grad}$ ?
12. Что такое потенциометр и каково его назначение в данной установке?
13. Каким образом можно повысить точность построения линий равного потенциала в данной работе?
14. Электростатическое поле является консервативным. Что это означает?

### Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – Т. 2. – С. 84 – 86.
2. Савельев, И.В. Курс физики / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 2. – С. 14 – 48.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М. : Лань, 2005. – Т. 1.
4. Бондарев, Б.В. Курс общей физики / Б.В. Бондарев, Н.П. Калашников, Г.Г. Спирин. – М. : Высшая школа, 2003. – Т. 2. – С. 85 – 89.
5. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М. : Высшая школа, 2002. – С. 182 – 201.
6. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 2001. – С. 174 – 177.
7. Зисман, Г.А. Курс общей физики / Г.А. Зисман, О.М. Годес. – М. : Наука, 1967. – Т. 2. – С. 76 – 84.
8. Грабовский, Р.И. Курс физики / Р.И. Грабовский. – М. : Лань, 2004. – С. 112–113.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ МЕЖДУ ОБКЛАДКАМИ КОНДЕНСАТОРА И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЁРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА

*Цель работы:* ознакомиться с методом определения напряжения между пластинами плоского конденсатора и научиться определять относительную диэлектрическую проницаемость.

*Приборы и принадлежности:* торсионные весы, штангенциркуль, пластинки твёрдых диэлектриков.

### Принцип метода и вывод расчётной формулы

Весами напряжения называется прибор, позволяющий измерять электрическое напряжение, приложенное к двум параллельно расположенным пластинам, путём измерения силы притяжения этих пластин друг к другу. Связь между силой взаимодействия пластин и электрическим напряжением, действующим между ними, можно установить следующим образом.

При подаче на конденсатор высокого напряжения на каждой из пластин будет заряд  $q$ , равный по величине и противоположный по знаку.

Внесение в электрическое поле диэлектрика изменяет это поле. Дело в том, что на диэлектрике в поле возникают заряды, которые и изменяют электрическое поле. На диэлектрике появляются электрические полюсы, поэтому это явление получило название **поляризации**. Заряды, возникающие на диэлектрике называют **поляризационными** или **связанными**. Поляризационные заряды разных знаков связаны между собой и могут смещаться на малые расстояния в пределах одной молекулы диэлектрика, поэтому их называют связанными. неполяризованный диэлектрик, т.е. находящийся в отсутствии электрического поля, можно представить как собрание молекул, в которых положительные и отрицательные заряды равномерно распределены. При поляризации заряды в каждой молекуле диэлектрика смещаются так, что на одном конце молекулы появляется положительный заряд, на другом отрицательный. Каждая молекула при этом превращается в электрический диполь.

В качестве величины, характеризующей степень поляризации диэлектрика, берётся дипольный момент единицы объёма диэлектрика. Эта величина называется вектором поляризации:

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p},$$

где  $\vec{p}$  – дипольный момент молекулы диэлектрика, равный произведению заряда диполя на расстояние между ними  $\vec{p} = q\vec{l}$ .

Расстояние  $\vec{l}$  называется плечом диполя. Это вектор, направленный от отрицательного к положительному заряду.

Поляризация приводит к уменьшению напряжённости электрического поля, создаваемого внешними зарядами в диэлектрике. Ослабление электрического поля в диэлектрике характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Значение этой величины зависит от строения и свойств диэлектрика и его способности поляризоваться во внешнем электрическом поле. Итак, каждая из пластин конденсатора будет находиться в однородном поле, создаваемом другой пластиной. Сила, действующая на одну из пластин со стороны другой пластины, определяется так:

$$F = E_1 q,$$

где  $E_1$  – напряжённость поля, создаваемого одной пластиной.

Напряжённость  $E_1$  связана с поверхностной плотностью заряда соотношением  $E = \frac{\delta}{2\epsilon\epsilon_0}$ , где  $\delta$  – поверхностная

плотность зарядов:  $\delta = \frac{g}{s}$ , так как электрическая сила  $F = qE$ , тогда  $F = \frac{\delta^2 s}{2\epsilon\epsilon_0}$ . Для конденсатора

$$g = CU,$$

где  $U$  – напряжение;  $C$  – ёмкость конденсатора.

Ёмкость плоского конденсатора равна

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 s}{d},$$

где  $d$  – расстояние между пластинами;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $S$  – площадь пластин. Для круглых пластин

$$S = \frac{\pi D^2}{4},$$

где  $D$  – диаметр пластин. Тогда  $F = \frac{\delta^2 s}{2\epsilon\epsilon_0} = \frac{g^2 s}{s^2 2\epsilon\epsilon_0} = \frac{c^2 U^2}{d^2 s 2\epsilon\epsilon_0} = \frac{\epsilon\epsilon_0 \pi D^2 U^2}{8 d^2}$ .

Откуда, после простых преобразований, получим  $U = 1,6 \frac{d}{D} \sqrt{\frac{F}{\epsilon\epsilon_0}}$ .

Если диэлектрическая проницаемость известного диэлектрика  $\epsilon_1$ , толщина его  $d_1$  и сила, действующая на одну из пластин  $F_1$ , то формула для расчёта напряжения примет вид:

$$U = 1,6 \frac{d_1}{D} \sqrt{\frac{F_1}{\epsilon_0 \epsilon_1}}. \quad (1)$$

Расчётная формула для нахождения диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2$  неизвестного диэлектрика (часть вторая) находится из следующих соображений.

Так как вторая часть работы выполняется при том же напряжении  $U$ , что и первая, то можно записать

$$U = 1,6 \frac{d_2}{D} \sqrt{\frac{F_2}{\epsilon_0 \epsilon_2}}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость неизвестного диэлектрика;  $d_2$  – его толщина;  $F_2$  – сила, действующая на каждую пластину. Решая совместно уравнения (1) и (2), получим расчётную формулу для диэлектрической проницаемости неизвестного диэлектрика.

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 \frac{F_2 d_2^2}{F_1 d_1^2}. \quad (3)$$

### Описание установки

Общий вид установки представлен на рис. 1. На лицевой стороне панели находится: тумблер 7, с помощью которого установка включается в сеть 220 В, индикаторная лампочка 6, загорающаяся при включении установки в сеть, ручка 5 потенциометра, регулирующая высокое напряжение, торсионные весы 4, к коромыслу которых подвешена на тонкой токопроводящей нити круглая металлическая пластина 3, диаметр которой задан. Вместе с нижней пластиной 1 они образуют плоский конденсатор, между обкладками которого вводится пластина 2 диэлектрика.

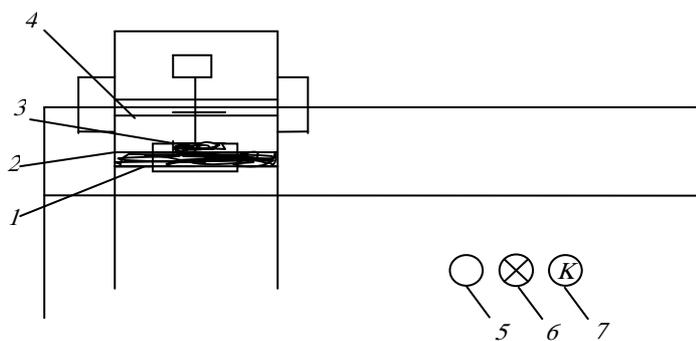


Рис. 1

Принципиальная схема установки представлена на рис. 2. При замыкании тумблера  $K_2$  понижающий трансформатор  $T_p$  включается в цепь 220 В. При этом загорается индикаторная лампочка  $L_2$ , включённая во вторичную обмотку трансформатора. Замыканием микровыключателя  $K_1$  напряжение питания подаётся через потенциометр  $R$  на источник высокого напряжения. От источника высокого напряжения (ИВН) высокое напряжение подаётся на пластины конденсатора. Замыкание микровыключателя  $K_1$  производится пластиной диэлектрика в тот момент, когда пластина полностью введена в пространство между обкладками конденсатора. Лампочка  $L_1$ , сигнализирующая о включении высокого напряжения, находится в камере торсионных весов и загорается при замыкании  $K_1$ .

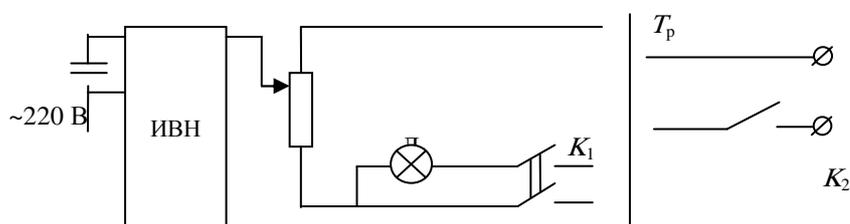


Рис. 2. Торсионные весы

Торсионные весы предназначены для быстро и точного взвешивания. Механизм весов смонтирован на металлической плите 1 и закрыт корпусом 4, который в целях безопасности должен быть обязательно заземлён. Верхняя пластина конденсатора 7 подвешена к концу подвижного рычага и вся система закрыта стеклянным ограждением 2, исключая возможность соприкосновения с частями весов, находящимися под высоким напряжением.

Головка *б* служит для подвода неподвижной стрелки на нулевое деление шкалы. С левой стороны находится головка *з*, используемая непосредственно при взвешивании. Эта головка вращает барабан со шкалой, по которой отсчитывается вес в миллиграммах. Головка *д* с правой стороны служит для блокирования подвижного рычага.

Взвешивание *з* вращать от себя до тех пор, пока неподвижная стрелка не достигает красной черты равновесия. Результат отсчитывается на неподвижной шкале в том месте, где находится неподвижная стрелка.

После отсчёта результата взвешивания шкалу следует установить в исходное положение, вращая головку *з* на себя.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с описанием прибора и методическими указаниями к данной работе.
2. Вставьте, при **ВЫКЛЮЧЕННОМ** источнике высокого напряжения, стеклянную пластинку в пространство между обкладками конденсатора.
3. Опустите верхнюю подвижную пластину конденсатора на стеклянную поверхность, вращением левой рукоятки торсионных весов на себя.
4. Измерьте вес верхней обкладки, плавным вращением левой рукоятки от себя до момента отрыва её от пластинки.
5. Определите вес обкладки по шкале торсионных весов (опыт повторите пять раз).
6. Включите тумблер **ВЫСОКОГО** напряжения.
7. Проведите пункты 4 и 5 с **ВЫСОКИМ** напряжением пять раз.
8. Выключите тумблер **ВЫСОКОГО** напряжения и выньте стеклянную пластину из установки.
9. Вставьте текстолитовую пластинку и проделайте пункты 4, 6, 7.
10. Повторите аналогичные пунктам 4, 6, 7 действия с пластиной из органического стекла.
11. Измерьте диаметры используемых диэлектриков.

Таблица 1

Опытные данные			Расчётные данные				
№	$P_0 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$F_{1, \text{обкл}} \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$F_1 = F_{1, \text{обкл}} - R$ $\cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_{1i} \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_{1i}^2 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$S \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_1 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$
1							
2							
3							
4							
5							
	$\bar{P}_0$				$\sum \Delta F_{1i}^2$		

**Расчёт абсолютной и относительной погрешностей измерений и определение разности потенциалов между обкладками конденсатора с известным диэлектриком:**

$$\bar{P}_0 = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{5}; \quad \frac{F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15}}{5};$$

а) рассчитайте абсолютные погрешности отдельного измерения:

$$\Delta F_{11} = |\bar{F}_1 - F_{11}|; \quad \Delta F_{12} = |\bar{F}_1 - F_{12}|; \quad \Delta F_{13} = |\bar{F}_1 - F_{13}|; \quad \Delta F_{14} = |\bar{F}_1 - F_{14}|; \quad \Delta F_{15} = |\bar{F}_1 - F_{15}|;$$

б) рассчитайте квадраты абсолютных погрешностей отдельных измерений:  $\Delta F_{11}^2; \Delta F_{12}^2; \Delta F_{13}^2; \Delta F_{14}^2; \Delta F_{15}^2$ ;

в) рассчитайте среднюю квадратичную погрешность  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta F_{1i}^2}{n(n-1)}}, \quad \text{где } n - \text{ число измерений.}$$

г) рассчитайте абсолютную ошибку  $\Delta F_1$  по формуле:  $\Delta F_1 = 2,8S$ ;

д) рассчитайте разность потенциалов между обкладками конденсатора по формуле:  $\bar{U} = 1,6 \frac{d_1}{D} \sqrt{\frac{F_1}{\epsilon_1 \epsilon_0}}$ ;

е) рассчитайте относительную ошибку  $E$  по формуле:

$$E = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta d_1}{d_1} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta F_1}{2F_1} + \frac{\Delta \epsilon_0}{2\epsilon_0} + \frac{\Delta \epsilon_1}{2\epsilon_1}.$$

*Указания:*

- 1) ошибки  $\Delta d_1, \Delta D = 0,05 \text{ мм}$  (ошибки прибора);
- 2)  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}; \Delta \epsilon_0 = 0,005 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$

3)  $\varepsilon = 7,0$ ;  $\Delta\varepsilon_1 = 0,05$ .

ж) рассчитайте абсолютную ошибку  $\Delta U$  по формуле:  $\Delta U = EU$ ;

з) запишите окончательный результат в виде:

$$U = \bar{U} \pm \Delta U.$$

Таблица 2

Опытные данные		Расчётные данные				
№	$F_{2,общ} \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$F_{2i} = F_{1,общ} \cdot R \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_{2i} \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_{2i}^2 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$S \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_2 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$
1						
2						
3						
4						
5						
	$\bar{F}_2$			$\sum \Delta F_{2i}^2$		

**Расчёт абсолютной и относительной погрешности измерений и определение относительной диэлектрической проницаемости текстолита:**

$$\bar{F}_2 = \frac{F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25}}{5};$$

а) рассчитайте абсолютные погрешности отдельного измерения

$$\Delta F_{21} = |\bar{F}_2 - F_{21}|; \Delta F_{22} = |\bar{F}_2 - F_{22}|; \Delta F_{23} = |\bar{F}_2 - F_{23}|; \Delta F_{24} = |\bar{F}_2 - F_{24}|; \Delta F_{25} = |\bar{F}_2 - F_{25}|;$$

б) рассчитайте квадраты абсолютных погрешностей отдельных измерений:  $\Delta F_{21}^2$ ;  $\Delta F_{22}^2$ ;  $\Delta F_{23}^2$ ;  $\Delta F_{24}^2$ ;  $\Delta F_{25}^2$ ;

в) рассчитайте среднюю квадратичную погрешность  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta F_{2i}^2}{n(n-1)}}, \text{ где } n - \text{ число измерений};$$

г) рассчитайте абсолютную ошибку  $\Delta F_1$  по формуле  $\Delta F_1 = 2,8S$ ;

д) рассчитайте относительную диэлектрическую проницаемость текстолитовой пластинки по формуле:  $\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 d_2^2 \bar{F}_2}{d_1^2 F_1}$ ;

е) рассчитайте относительную ошибку по формуле:

$$E = \frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2} = \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{2\Delta d_2}{d_2} + \frac{\Delta F_2}{F_2} + \frac{2\Delta d_1}{d_1} + \frac{\Delta F_1}{F_1};$$

ж) рассчитайте абсолютную ошибку  $\Delta \varepsilon_2$  по формуле  $\Delta \varepsilon_2 = E \varepsilon_2$ ;

з) запишите окончательный результат в виде:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2 \pm \Delta \varepsilon_2.$$

Таблица 3

Опытные данные		Расчётные данные				
№	$F_{3,общ} \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$F_{3i} = F_{3,общ} \cdot R \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_{3i} \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_{3i}^2 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$S \cdot 10^{-5} \text{ Н}$	$\Delta F_3 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$
1						
2						
3						
4						
5						
	$\bar{F}_3$			$\sum \Delta F_{3i}^2$		

**Расчёт абсолютной и относительной погрешностей измерений и определение относительной диэлектрической проницаемости органического стекла:**

$$\overline{F_3} = \frac{F_{31} + F_{32} + F_{33} + F_{34} + F_{35}}{5};$$

а) рассчитайте абсолютные погрешности отдельного измерения;

$$\Delta F_{31} = |\overline{F_3} - F_{31}|; \Delta F_{32} = |\overline{F_3} - F_{32}|; \Delta F_{33} = |\overline{F_3} - F_{33}|; \Delta F_{34} = |\overline{F_3} - F_{34}|; \Delta F_{35} = |\overline{F_3} - F_{35}|;$$

б) рассчитайте квадраты абсолютных погрешностей отдельных измерений:  $\Delta F_{31}^2$ ;  $\Delta F_{32}^2$ ;  $\Delta F_{33}^2$ ;  $\Delta F_{34}^2$ ;  $\Delta F_{35}^2$ ;

в) рассчитайте среднюю квадратичную погрешность  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta F_{3i}^2}{n(n-1)}}, \text{ где } n - \text{ число измерений};$$

г) рассчитайте абсолютную ошибку  $\Delta F_1$  по формуле  $\Delta F_3 = 2,8S$ ;

д) рассчитайте относительную диэлектрическую проницаемость пластинки из оргстекла  $\epsilon_3 = \frac{\epsilon_1 d_3^2 \overline{F_3}}{d_1^2 \overline{F_1}}$ ;

е) рассчитайте относительную ошибку по формуле:

$$E = \frac{\Delta \epsilon_3}{\epsilon_3} = \frac{\Delta \epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{2\Delta d_3}{d_3} + \frac{\Delta F_3}{F_3} + \frac{2\Delta d_1}{d_1} + \frac{\Delta F_1}{F_1};$$

ж) рассчитайте абсолютную ошибку  $\Delta \epsilon_3$  по формуле:  $\Delta \epsilon_3 = E \epsilon_3$

з) запишите окончательный результат в виде:

$$\epsilon_3 = \epsilon_3 \pm \Delta \epsilon_3.$$

### Контрольные вопросы

1. Нарисовать схему установки и объяснить принцип её действия.
2. Вывод расчётных формул для нахождения и диэлектрической проницаемости.
3. Теорема Остроградского – Гаусса и её применение к расчёту простейших полей.
4. Работа по перемещению заряда в электрическом поле.

### Литература

- Лабораторные работы по физике / Г.И. Длужневский и др. – М. : Высшая школа, 1960. – Раб. № 13.
2. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Л.Л. Гольдин и др. – М. : Наука, 1973. – Раб. № 33.
3. Лабораторный практикум по физике / В.А. Базакуца и др. – Харьков : Изд-во Харьковского ун-та, 1969. – Задача 18.
4. Курс физики / Б.М. Яворский и др. – М. : Высшая школа, 1968. – § 2.4; 3.1.
5. Зисман, Г.А. Курс общей физики / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – М. : Наука, 1967. – § 6, 7.
6. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1970.