

КуАИ 15(045)

и 39

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

39

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. академика С. П. КОРОЛЕВА

---

**ИЗУЧЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА  
(задания 2—1, 2—2, 2—4, 2—10)**

**КУЙБЫШЕВ 1979**

Любая система зарядов создает в окружающем пространстве электрическое поле, которое проявляется в том, что на заряд, помещенный в какую-либо точку поля, действует сила. В частности, если поле создается точечным зарядом  $q_1$  в некоторой однородной и бесконечно протяженной среде, то на другой точечный заряд  $q_2$ , находящийся на расстоянии  $r$  от заряда  $q_1$ , будет действовать сила, модуль которой в системе СИ определяется выражением:

$$F = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}. \quad (1)$$

Эта сила направлена вдоль линии, соединяющей заряды.

В формуле (1) величина  $\epsilon_0$  называется электрической постоянной. Ее численное значение равно  $8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м.  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой создано поле.  $\epsilon$  характеризует электрические свойства среды (для вакуума  $\epsilon = 1$ , для любой другой среды  $\epsilon > 1$ ).

Из формулы (1) следует, что сила взаимодействия двух зарядов  $q_1$  и  $q_2$  в вакууме в  $\epsilon$  раз больше, чем сила взаимодействия в среде. (Конечно, при условии, что расстояние между зарядами не изменяется).

Одной из характеристик электрического поля является напряженность электрического поля  $\vec{E}$ , определяемая как отношение силы  $\vec{F}$ , действующей на внесенный в поле точечный заряд  $q$ , к величине этого заряда, т. е.

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

Напряженность поля, создаваемого системой зарядов, определяется как векторная сумма напряженностей полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности (принцип суперпозиции).

Другой важной характеристикой поля является потенциал  $\phi$ . В отличие от напряженности поля, потенциал не определя-

ется однозначно для какой-либо точки поля. Мы можем найти лишь *разность* потенциалов между двумя точками поля, которая численно равна работе, совершаемой силами поля при перемещении единицы положительного заряда из одной точки в другую, т. е.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (3)$$

Поэтому потенциалу произвольной точки поля всегда можно приписать любое, наперед заданное значение. Если это сделано, то значение потенциала во всех остальных точках поля определяется однозначно с помощью уравнения (3).

Из общей формулы для работы, совершаемой над телом при его перемещении из точки 1 в точку 2,

$$A = \int_1^2 (\vec{F}, d\vec{l}) \quad (4)$$

после подстановки выражения электростатической силы  $F$ , следует

$$A = \int_1^2 (q\vec{E}, d\vec{l}) = q \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}). \quad (5)$$

Работа сил электростатического поля не зависит от вида траектории заряда и определяется положением начальной и конечной точек траектории. В частном случае работа по замкнутой траектории равна нулю, т. е.

$$A = q \oint (\vec{E}, d\vec{l}) = 0 \quad (6)$$

или  $\oint (\vec{E}, d\vec{l}) = 0. \quad (7)$

Интеграл указанного вида по замкнутому контуру называется циркуляцией. Полученный результат можно сформулировать так: циркуляция вектора напряженности электрического поля по замкнутому контуру равна нулю.

Используя формулу (6), можно установить связь между напряженностью поля и потенциалом в следующем виде:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k}\right). \quad (8)$$

Итак, реально существующему электрическому полю можно поставить в соответствие два взаимосвязанных математических поля. Одно из них — векторное поле напряженности  $\vec{E}$ , другое — скалярное поле потенциала  $\varphi$ .

Для графического изображения этих полей вводится понятие силовой линии и эквипотенциальной поверхности. Силовой линией поля называется линия, касательная к которой в каждой ее точке совпадает по направлению с вектором  $\vec{E}$  в тех же точках. Совокупность силовых линий определяет векторное поле  $\vec{E}$ .

Эквипотенциальной поверхностью называется геометрическое место точек поля, в которых потенциал имеет одно и то же значение. В частности, поверхность каждого заряженного проводника является эквипотенциальной поверхностью. Совокупность эквипотенциальных поверхностей определяет скалярное поле  $\varphi$ .

Согласно уравнению (8), силовые линии образуют систему линий, ортогональных к эквипотенциальным поверхностям. Для нахождения напряженности поля в какой-либо точке силовой линии спроектируем уравнение (8) на направление силовой линии. Получим

$$E_l = -\frac{\partial \varphi}{\partial l}, \quad (9)$$

где  $dl$  — элемент длины силовой линии, на которой потенциал изменяется на величину  $d\varphi$ ;  $E_l$  — проекция вектора напряженности поля на направление силовой линии. Согласно определению силовой линии,  $E_l = E$ . Знак  $\ominus$  указывает, что вектор напряженности направлен в сторону *убывания* потенциала.

Соотношение (9), выраженное в конечных разностях, т. е. представленное в виде:

$$E_{\text{ср}} = \frac{|\Delta \varphi|}{\Delta l}, \quad (10)$$

может быть использовано для расчета среднего значения напряженности поля, если известно положение эквипотенциальных поверхностей.

На рис. 1 показан пример расположения эквипотенциальных поверхностей (сплошные линии) и силовых линий (пунктир) поля диполя. Сред-

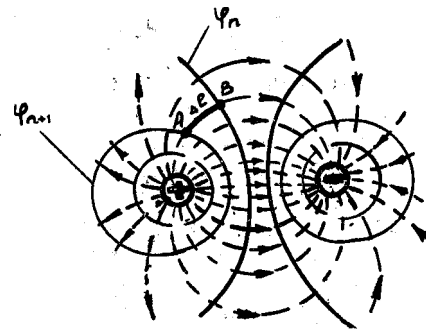


Рис. 1

ная напряженность поля, например, на участке АВ равна

$$E_{A-B} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta l} = \frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{\Delta l}. \quad (11)$$

Введение понятия потенциала значительно облегчает решение задач электростатики, так как определение векторного поля напряженности  $\vec{E}$  сводится к нахождению поля скаляра  $\varphi$ . С другой стороны, экспериментальное определение потенциала оказывается значительно проще, чем измерение напряженности поля, так как большинство приборов, пригодных для изучения полей, измеряют разность потенциалов, а не напряженность поля.

## ДИЭЛЕКТРИКИ

Диэлектриком называется любое непроводящее вещество (изолятор). Молекулы диэлектрика, представляющие собой систему положительных и отрицательных зарядов, можно рассматривать как диполи. Диполем называется система двух точечных зарядов, одинаковых по величине, но противоположных по знаку (рис. 2). Поле диполя на расстояниях значительно больших, чем расстояние между зарядами, определяется величиной  $\vec{p}_i = q \cdot \vec{l}$ , называемой *дипольным или электрическим моментом*.

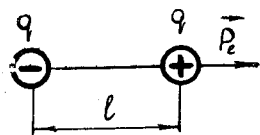


Рис. 2

В электрическом поле дипольные моменты молекул диэлектрика ориентируются по полю. Если поле неоднородно, то на диполи, кроме вращающего, ориентирующего по полю механического момента, действует сила, втягивающая свободные диполи в область более сильного поля. Конкурирующий процесс — тепловое движение молекул — стремится создать равномерное распределение дипольных моментов по направлениям. В результате устанавливается лишь преимущественная ориентация электрических молекул по полю, что приводит к появлению макроскопического электрического момента рассматриваемого объема диэлектрика. Этот процесс называется *поляризацией диэлектрика*. Количественно поляризация диэлектрика определяется вектором поляризации  $\vec{P}$ ,

который находится по формуле:

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (\vec{p}_i)_i}{\Delta V}, \quad (12)$$

где суммирование ведется по всем молекулам объема  $\Delta V$ .

Поляризация диэлектриков приводит к образованию *связанных* зарядов в диэлектрике. Поле связанных зарядов, складываясь с внешним полем, образует результирующее поле в диэлектрике. Можно показать, что когда диэлектрик заполняет объем, ограниченный эквипотенциальными поверхностями, напряженность результирующего поля в  $\epsilon$  раз меньше, чем напряженность внешнего поля, т. е. поля свободных зарядов.

Наряду с напряженностью поля часто используется физическая величина  $\vec{D}$ , называемая электрическим смещением или электрической индукцией и определяемая формулой:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (13)$$

Используя опытные данные о том, что вектор поляризации пропорционален напряженности поля, можно представить последнюю формулу в виде

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}. \quad (14)$$

Для рассмотренного выше случая, когда диэлектрик заполняет объем, ограниченный эквипотенциальными поверхностями (например, объем между обкладками плоского конденсатора), вектор электрического смещения не изменится, тогда как напряженность поля уменьшится в  $\epsilon$  раз.

Численное значение относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  составляет несколько единиц, в крайнем случае несколько десятков. Однако существует класс веществ, для которых  $\epsilon$  может достигать весьма больших значений — порядка нескольких тысяч. Такие вещества называются сегнетоэлектриками.

Сегнетоэлектрики отличаются от обычных диэлектриков следующими характерными особенностями:

1. Наличием у них спонтанной (т. е. самопроизвольной) поляризации. Исследования показали, что сегнетоэлектрик состоит из областей, называемых доменами. В каждом домене электрические моменты всех молекул ориентированы в каком-либо определенном направлении, поэтому домены оказы-

ваются полностью поляризованными даже при отсутствии электрического поля. Однако вектор поляризации достаточно большого кристалла сегнетоэлектрика равен нулю, так как электрические моменты доменов имеют различные направления и в целом компенсируют друг друга.

2. Сегнетоэлектрики сохраняют свои свойства лишь в некотором интервале температур, вне которого они ведут себя как обычные диэлектрики. Граничные значения температур называются нижней и верхней точкой Кюри. Вблизи точек Кюри происходит фазовый переход в кристалле сегнетоэлектрика, который сопровождается резким изменением относительной диэлектрической проницаемости.

3. В переменном электрическом поле значения вектора поляризации  $\vec{P}$  отстают от напряженности поля. Это явление называется гистерезисом. Зависимость  $P = f(E)$  имеет вид, представленный на рис. 3. Такая кривая называется петлей гистерезиса.

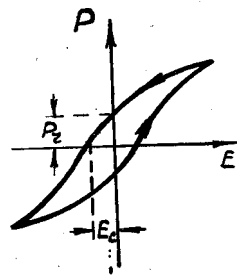


Рис. 3

Из графика видно, что при обращении  $E$  в нуль сегнетоэлектрик остается поляризованным. Значение  $P_r$  называется остаточной поляризацией. Чтобы поляризация была равна нулю, нужно приложить обратную напряженность поля  $E_c$ , которая называется коэрцитивной силой сегнетоэлектрика.

4. Все сегнетоэлектрики поляризуются при деформации, и наоборот, деформируются при поляризации. Эти явления называются соответственно прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом.

5. Зависимость  $D$  от  $E$  нелинейная, поэтому относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  оказывается зависимой от напряженности поля.

Одним из наиболее известных сегнетоэлектриков является титанат бария, широко применяемый в электро- и радиотехнике.

### ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрическое поле в конденсаторах почти полностью сосредоточено между его обкладками. Энергия этого поля определяется эквивалентными выражениями:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}, \quad (15)$$

где  $U$  — напряжение на обкладках конденсатора.

Используя формулу для емкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (16)$$

где  $S$  — площадь обкладок,

$d$  — расстояние между обкладками,

можно найти объемную плотность энергии электрического поля:

$$w = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}. \quad (17)$$

### Задание 2—1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель задания — экспериментальное изучение распределения потенциала в электрическом поле, а также построение системы силовых линий с использованием свойства ортогональности.

Приборы и принадлежности: планшеты с электродами, пантограф, вольтметр, гальванометр, реостат.

**Зондовый метод исследования электростатического поля.** Сущность зондового метода заключается в следующем: в исследуемую точку поля вводится дополнительный электрод — зонд, который соединен с прибором, измеряющим приобретенный зондом потенциал относительно какой-либо точки поля, выбранной за начало отсчета. При этом необходимо обеспечить такие условия, чтобы потенциал зонда действительно равнялся потенциалу той точки поля, куда он помещен и, кроме того, необходимо, чтобы зонд своим присутствием минимально искажал поле. В общем случае эта задача является весьма сложной. Поэтому часто прямое изучение электростатического поля заменяется изучением его модели. Оказывается, что такой моделью может служить поле постоянного тока в некоторой среде между системой проводников при условии, что потенциалы проводников поддерживаются постоянными. В этом случае распределение потенциалов в проводящей среде является тождественным с распределением потенциалов в электростатическом поле между теми же электродами, если поместить их в вакуум или однородный диэлектрик.

Указанная замена поля неподвижных зарядов полем стационарного тока дает большие экспериментальные преимущества: так, вводимые в проводящую среду металлические зонды автоматически приобретают потенциал той точки поля, в которую они помещены. При этом потенциал зонда легко можно измерить с помощью несложной токоизмерительной аппаратуры. Этот метод широко применяется при изучении сложных электростатических полей в радиолампах, электростатических линзах, ионных космических двигателях и т. д.

На практике наибольшее распространение получило моделирование полей в электролитической ванне, где проводящей средой является электролит (проводник второго рода), и моделирование полей на электропроводящей бумаге, где проводящей средой является графитизированная бумага (проводник первого рода).

В данном упражнении использован последний метод моделирования.

#### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 4 представлена схема экспериментальной установки. На пластине 1 закреплен лист электропроводящей бумаги. Электроды 2' и 2'' приклеены к бумаге электропроводящим клеем. Потенциал зонда 3

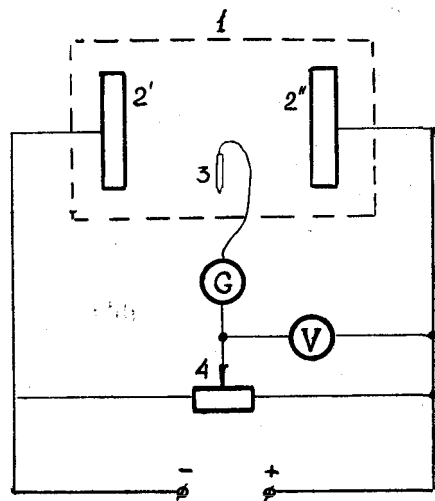


Рис. 4

относительно электрода 2 устанавливается с помощью потенциометра 4 и контролируется вольтметром V.

В цепь зонда включен гальванометр G с двухсторонней шкалой. Если зонд находится в точке поля, потенциал которой равен потенциалу, установленному на движке потенциометра, то ток в цепи зонда и гальванометра будет отсутствовать. Геометрическое место всех таких точек образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле.

Фиксирование положения и формы определяемой экспериментально эквипотенциальной линии производится на чистом листе бумаги, закрепленном в зажимах рядом с планшеткой. Для этой цели применяется специальный параллелограммный механизм — пантограф. Пантограф устроен таким образом, что траектория движения его ведущего конца, на котором установлен зонд, точно воспроизводится фиксатором пантографа с некоторым постоянным коэффициентом подобия. Конструктивно фиксатор выполнен в виде иглы с пружиной, которая закреплена на одном из рычагов пантографа. Если после нахождения каждой точки эквипотенциальной поверхности нажимать на иглу фиксатора, то на чистом листе бумаги, закрепленном под иглой, будут оставаться отметки. Соединяя эти отметки плавной линией, мы воспроизведем на бумаге геометрическую форму и размеры сечения эквипотенциальной поверхности.

**ВНИМАНИЕ!** Во избежание порчи и разрыва электропроводной бумаги необходимо перемещать пантограф только при поднятом над поверхностью бумаги зондом. Касание зондом бумаги при определении точек эквипотенциальных поверхностей следует производить при неподвижном пантографе.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

1. Собрать схему согласно рис. 4.
2. Укрепить на подставке рядом с планшеткой лист чистой бумаги.
3. Не включая схемы, перенести на бумагу с помощью пантографа сечение заранее известных эквипотенциальных поверхностей: внешних очертаний электродов.
4. Включить схему и приступить к определению эквипотенциальных поверхностей. Рекомендуется построить 6—8 поверхностей при одинаковой разности потенциалов между ними.

Если между электродами есть промежуточное металлическое тело, то необходимо определить его потенциал. Для этого следует поставить зонд на промежуточное тело и с помощью потенциометра добиться, чтобы ток через зонд был равен нулю. Соответствующее показание вольтметра даст значение потенциала этого тела, а следовательно, значение потенциала эквипотенциальной поверхности, совпадающей с внешними очертаниями промежуточного тела.

1. Полученную на бумаге графическую картину распределения эквипотенциальных поверхностей следует дополнить силовыми линиями, пользуясь свойством ортогональности. При окончательной доработке графика необходимо принимать во внимание симметрию данной системы электродов, а следовательно, и поля.

2. Найти распределение напряженности поля вдоль оси симметрии электродов, учитывая, что коэффициент подобия пантографа равен 1:2.

3. Построить график зависимости напряженности поля от координаты вдоль оси симметрии электродов.

Задание 2—2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель задания — экспериментальное определение относительной диэлектрической проницаемости некоторых жидких диэлектриков.

Приборы и принадлежности: сосуды с исследуемыми жидкостями, в крышки которых вмонтированы конденсаторы, магазин емкостей, мост переменного тока.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

Метод основан на сравнении электроемкости конденсатора, между пластинами которого находится диэлектрик, с электроемкостью этого же конденсатора, когда он находится в воздухе. Строго говоря, вторично нужно было бы измерить емкость конденсатора не в воздухе, а в вакууме, так как

$$\epsilon = \frac{C_{\text{ср}}}{C_{\text{вак}}}$$

Но для воздуха при нормальных условиях  $\epsilon = 1,0006$ , а поэтому можно практически принять, что

$$\epsilon = \frac{C_{\text{ср}}}{C_{\text{возд}}} \quad (18)$$

Исследуемый диэлектрик находится в сосуде, внутри которого смонтирован цилиндрический конденсатор (рис. 5). Обкладки конденсатора 1 и 2 соединены с клеммами 3 и 4 на верхней крышке сосуда. Крышку можно поднять и зафиксировать винтом 6 на направляющем стержне 5, что соответствует положению: «конденсатор — в воздухе». Если крышка опущена, то конденсатор находится в диэлектрике.

Для измерения емкости конденсатора в этих двух положениях применяется так называемая мостиковая схема. Мост состоит из двух конденсаторов — исследуемого  $C_x$  и эталонного  $C_{\text{эт}}$  и двух сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 6).

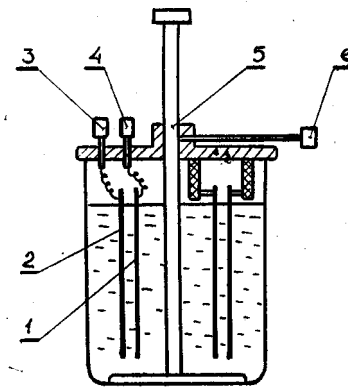


Рис. 5

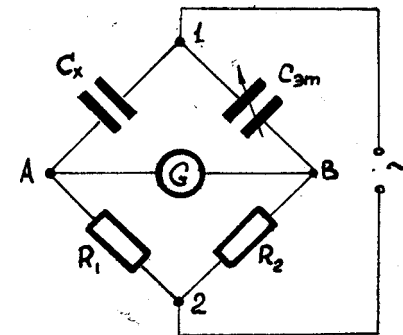


Рис. 6

В качестве эталонного конденсатора применен магазин емкостей. К точкам 1 и 2 подключается переменное напряжение от звукового генератора. Если потенциалы в точках A и B равны, что может быть установлено по отсутствию тока в гальванометре G, то между сопротивлениями моста существует следующая связь:

$$Z_{C_x} = Z_{C_{\text{эт}}} \frac{R_1}{R_2}, \quad (19)$$

где  $Z_{C_x}$  и  $Z_{C_{\text{эт}}}$  — емкостные сопротивления соответственно исследуемого и эталонного конденсаторов, определяемые по формулам

$$Z_{C_x} = \frac{1}{\omega C_x}; \quad Z_{C_{\text{эт}}} = \frac{1}{\omega C_{\text{эт}}}. \quad (20)$$

Подставив значения  $Z_{Cx}$  и  $Z_{C_{эт}}$  в формулу (19), получим следующее соотношение

$$C_x = C_{эт} \frac{R_2}{R_1}. \quad (21)$$

Конструктивно звуковой генератор и мостиковая схема с гальванометром, снабженным полупроводниковым преобразователем, объединены в общий блок. На лицевую панель блока выведены клеммы для подключения  $C_x$  и  $C_{эт}$ , а также клеммы питания звукового генератора. Напряжение питания — 6 В. Здесь же указано отношение  $R_2/R_1$ .

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

1. Поставить тумблер  $K$  на передней панели блока в положение «Выкл.». Подключить к измерительному блоку конденсаторы  $C_x$  и  $C_{эт}$  и питание к звуковому генератору.

2. Измерить емкость конденсатора  $(C_x)_{жидк}$ , когда он погружен в исследуемую жидкость. Для этого тумблером  $K$  подключается переменное напряжение звуковой частоты к мосту и вращением рукоятки магазина с «×0,0001» добиваются минимального тока в гальванометре. Остальные декады магазина предварительно следует установить на нуль. Если рукоятки плавной регулировки емкости не хватает для балансировки моста, то нужно включить первую декаду.

3. Поднять крышку с конденсатором. Измерить емкость конденсатора в воздухе —  $(C_x)_{возд}$ .

4. Повторить указанные в п. 2 и 3 измерения несколько раз.

5. Найти значения  $(C_x)_{жидк}$  и  $(C_x)_{возд}$  для другого диэлектрика.

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитать емкости конденсаторов  $(C_x)_{жидк}$  и  $(C_x)_{возд}$  по формуле

$$C_x = (C_{шк} + C_0) \frac{R_2}{R_1}, \quad (22)$$

где  $C_{шк}$  — емкость, определяемая по шкалам магазина емкостей;  $C_0$  — корпусная емкость магазина.

Величина  $C_0$  указана на табличке магазина.

2. Определить относительную диэлектрическую проницаемость исследуемой жидкости.

3. Найти среднее значение относительной диэлектрической проницаемости для каждой жидкости. Вычислить абсолютную и относительную погрешности  $\epsilon$ .

4. Результаты всех измерений и расчетов записать в табл. 1 по прилагаемой форме.

Таблица 1

№ опыта	Наименование жидкости	$(C_x)_{жидк}$ пкф	$(C_x)_{возд}$ пкф	$\epsilon$	$\epsilon_{ср}$

#### Задание 2—4

### ГРАДУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВОЛЬТМЕТРА ПО АБСОЛЮТНОМУ ЭЛЕКТРОМЕТРУ

Цель задания — установление связи между показаниями вольтметра и значениями приложенного к нему напряжения.

Приборы и принадлежности: абсолютный электрометр, изготовленный на основе технических весов 1 класса; источник регулируемого высоковольтного напряжения; электростатический вольтметр.

#### ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Приборы, позволяющие проводить измерения разности потенциалов без предварительной градуировки, называются абсолютными электрометрами. В данной работе представлен абсолютный электрометр, действие которого основано на явлении взаимного притяжения пластин плоского конденсатора.

Найдем силу  $f$  действия поля положительно заряженной пластины на отрицательно заряженную пластину конденсатора. Для этого можно воспользоваться уравнением

$$f = qE, \quad (23)$$

где  $q$  — заряд отрицательно заряженной пластины,



$E$  — напряженность поля, создаваемого положительно заряженной пластиной. Заряд пластины конденсатора определяется по формуле

$$q = C (\varphi_2 - \varphi_1), \quad (24)$$

где  $C$  — емкость конденсатора;

$\varphi_2 - \varphi_1$  — разность потенциалов между пластинами.

Напряженность поля, создаваемая одной пластиной, равна половине напряженности поля конденсатора, т. е.

$$E = \frac{1}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d}, \quad (25)$$

где  $d$  — расстояние между пластинами.

Подставляя выражения (24) и (25) в уравнение (23), получим

$$f = \frac{C (\varphi_2 - \varphi_1)^2}{2d}. \quad (26)$$

Очевидно, что такая сила действует и на положительно заряженную пластину конденсатора.

Используя выражение для емкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (27)$$

уравнение (26) можно записать в виде

$$f = \frac{\epsilon \epsilon_0 S (\varphi_2 - \varphi_1)^2}{2d^2}, \quad (28)$$

откуда

$$\varphi_2 - \varphi_1 = d \sqrt{\frac{2f}{\epsilon \epsilon_0 S}}, \quad (29)$$

или окончательно

$$U = \frac{d}{D} \sqrt{\frac{8f}{\pi \epsilon \epsilon_0}}, \quad (30)$$

где введено обозначение  $\varphi_2 - \varphi_1 = U$ , а площадь пластин, имеющих форму круглых дисков, выражена через их диаметр  $D$ .

Формула (30) показывает возможность проведения абсолютных измерений разности потенциалов путем измерения силы взаимного притяжения пластин конденсатора. В абсолютном электрометре эта сила измеряется с помощью чувствительных рычажных весов, одна из чашек которых заменена пластиной конденсатора.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В комплект установки (рис. 7) входят: абсолютный электрометр 1, источник высоковольтного напряжения 10 и электростатический вольтметр 6, которые смонтированы на общем основании.

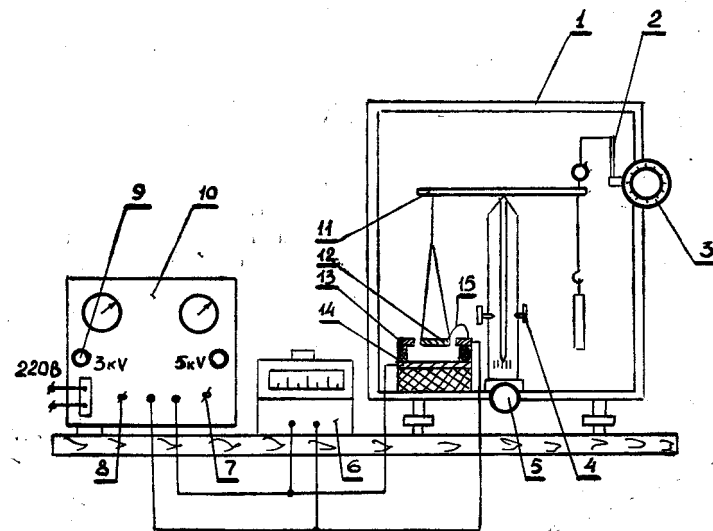


Рис. 7

Главной частью электрометра является плоский конденсатор, состоящий из неподвижной пластины 14 и подвижной пластины 12. В одной плоскости с пластиной 12 находится неподвижное кольцо 13. Между пластиной 12 и кольцом 13 имеется зазор. Электрическая связь кольца и пластины осуществляется посредством тонкой проволоочки 15.

Если зарядить конденсатор до какой-либо разности потенциалов, то электрическое поле между пластинами 12 и 14 будет однородно, так как искажение поля заметно сказывается только у внешних краев кольца и пластины 14. Такое кольцо, обеспечивающее однородность электрического поля в плоском конденсаторе, называется охраняющим.

Подвижная пластина 12 подвешена к коромыслу 11 технических весов. На другое плечо коромысла можно подвешивать разновески от 10 до 990 мг с помощью манипулятора 2.

Ручки управления 3 манипулятором выведены на переднюю панель электрометра. Наружная ручка устанавливает сотни мг, внутренняя — десятки мг.

Величина использованных равновесок при некотором положении ручек определяется числом, образованным из цифр, которые нанесены на ручках манипулятора против указательной стрелки.

Ограничение хода весов обеспечивается упорными винтами 4. Ручка 5, расположенная на нижней части электрометра, служит для арретирования коромысла 11.

Высокое напряжение к конденсатору электрометра подводится от источника высоковольтного напряжения 10. На передней панели источника размещены выходные клеммы высокого напряжения, вход питания от сети 220 В и ручки управления прибором. Включение прибора производится путем поворота специального ключа 8. Тумблер 7 служит для включения блока высокого напряжения прибора. Регулировка высокого напряжения производится ручкой 9. Параллельно конденсатору электрометра включен электростатический вольтметр 6, подлежащий градуировке.

В некоторых установках источником высокого напряжения является высоковольтный трансформатор. Регулировка напряжения, подаваемого от трансформатора на конденсатор электрометра, производится с помощью автотрансформатора, который питается от сети 220 В.

**ВНИМАНИЕ!** В работе используется высокое напряжение до 3 кВ, *опасное для жизни*. Поэтому необходимо тщательно соблюдать правила техники безопасности. Все действия с электрометром: установка равновесок манипулятора и арретирование коромысла — следует производить плавно и медленно во избежание срыва коромысла с призм и замыкания пластин конденсатора.

#### КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

1. Включать установку без предварительной проверки ее преподавателем.
2. Открывать дверцы электрометра и производить там какие-либо регулировочные работы.
3. Изменять монтажную схему установки.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

1. После проверки исправности установки преподавателем включить установку в сеть 220 В.

2. Включить источник высоковольтного напряжения ключом 8.

3. Через 2—3 минуты после прогрева источника включить блок высокого напряжения тумблером 7. При этом загорается красная лампочка на передней панели прибора, а контрольный вольтметр показывает наличие напряжения на выходе источника.

4. Установить ручками манипулятора 3 наименьшую величину нагрузки согласно табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Нагрузка, мг	20	50	100	200	300	400	500

5. Медленным поворотом ручки 5 освободить коромысло электрометра.

6. Плавно увеличивать напряжение ручкой 9, одновременно наблюдая за положением стрелки электрометра. Зафиксировав момент отрыва стрелки от левого упорного винта 4, записать соответствующее показание вольтметра, после чего уменьшить напряжение поворотом ручки 9 влево до упора.

7. Провести повторное измерение согласно п. 6.

8. Арретировать электрометр плавным поворотом ручки 5. Увеличить нагрузку на правое плечо коромысла в соответствии с табл. 2.

9. Провести градуировочные измерения при новой нагрузке согласно п. 5—6.

10. Измерения производятся до тех пор, пока не будет пройдена вся шкала вольтметра.

После окончания измерений необходимо немедленно выключить блок высокого напряжения тумблером 7, арретировать электрометр и полностью снять нагрузку с коромысла.

11. Результаты измерений записать в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

№ измерения	$f$ мг	$U'$ В	$U''$ В	$U_{ср}$ В	$U_{расч}$ В

Здесь  $U'$  и  $U''$  — показания электростатического вольтметра при постоянной нагрузке (соответствующей п. 6, 7), а

$$U_{\text{ср}} = \frac{U' + U''}{2}.$$

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитать значения разности потенциалов на пластинах по формуле (30). При проведении расчетов следует учесть, что сила  $f$  в формуле (30) должна быть выражена в ньютонах. Значения  $d$  и  $D$  приведены на панели установки.

2. Результаты расчетов занести в табл. 3.

3. Построить градуировочную кривую вольтметра, т. е. зависимость

$$U_{\text{ср}} = f(U_{\text{расч}}).$$

### Задание 2—10

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТИТАНА БАРИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель задания — изучение зависимости относительной диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры и определение верхней точки Кюри.

Приборы и принадлежности: электропечь с образцом титаната бария; микроамперметр.

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Если на обкладки конденсатора подать переменное напряжение  $U$ , то через образец титаната бария будет протекать ток, который можно найти по закону Ома для цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U \omega C, \quad (31)$$

где  $Z = \frac{1}{\omega C}$  — емкостное сопротивление конденсатора;

$\omega$  — круговая частота переменного тока.

Для  $\nu = 50$  Гц,  $\omega = 314$  с<sup>-1</sup>.

Емкость плоского конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}. \quad (32)$$

Подставляя выражение (32) в формулу (31) и решая полученное уравнение относительно  $\epsilon$ , находим

$$\epsilon = \frac{Id}{U \omega \epsilon_0 S}. \quad (33)$$

Таким образом, зная ток  $I$ , проходящий через образец, геометрические размеры конденсатора и напряжение  $U$ , можно найти относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ .

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 8 представлена схема экспериментальной установки.

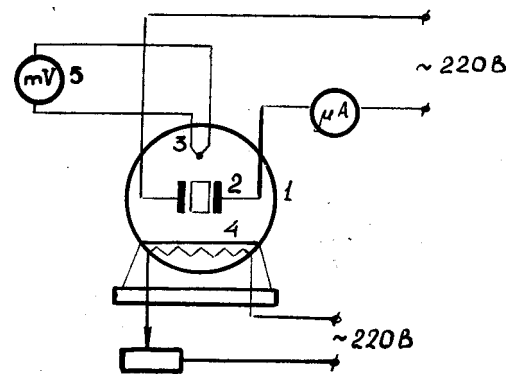


Рис. 8

В электропечи 1 помещен плоский конденсатор 2, который представляет собой пластинку титаната бария с посеребренными боковыми поверхностями, играющими роль обкладок конденсатора. Обкладки соединены с клеммами, установленными на панели в верхней части корпуса печи.

Для нагрева печи используется спиральный нагревательный элемент 4, питаемый от сети переменного тока через регулирующее сопротивление  $R$ .

Температура в рабочем объеме печи может быть определена с помощью термопары 3, соединенной с милливольтметром.

ром 5. Для обеспечения равномерного нагрева и уменьшения гистерезисных явлений (отставание температуры образца от температуры в печи) образец титаната бария находится в стакане с термостойкой кремний-органической жидкостью.

**ВНИМАНИЕ!** Установку следует передвигать только в случае крайней необходимости, ни в коем случае не наклонять и не подвергать резким толчкам во избежание расплескивания жидкости и попадания ее на раскаленную спираль печи.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

1. Собрать схему (см. рис. 8). Обратит особое внимание на правильное включение микроамперметра.

2. Включить электропечь тумблером, расположенным на передней панели печи. Реостат печи должен быть выведен.

3. В процессе нагревания титаната бария следует регистрировать напряжение  $U$  и силу тока  $I$ , проходящего через образец, а также соответствующее значение показаний милливольтметра, соединенного с термопарой —  $U_{t_n}$ .

4. После того, как ток начнет уменьшаться, что свидетельствует о прохождении точки Кюри, печь следует выключить и продолжать измерения. Вначале за счет тепловой инерции температура в печи будет несколько возрасть, а затем печь начнет охлаждаться.

Обратить внимание на вторичное прохождение точки Кюри. Измерения заканчиваются, когда температура в печи снизится примерно до  $80^\circ\text{C}$ . Следует особо выделить максимум тока при нагревании и охлаждении, а также ток при максимально допустимой температуре в печи.

5. Результаты измерений записать в табл. 4 ( $t_n$ ,  $t_0$  и  $t$  заполняются при обработке результатов измерений).

Таблица 4

Нагрев образца					Охлаждение образца				
$U$ В	$I$ мка	$U_{t_n}$ мВ	$t_n$ $^\circ\text{C}$	$t$ $^\circ\text{C}$	$U$ В	$I$ мка	$U_{t_0}$ мВ	$t_0$ $^\circ\text{C}$	$t$ $^\circ\text{C}$

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Пользуясь градуировочной шкалой, найти значения температуры  $t_n$  и  $t_0$ , соответствующие показаниям милливольтметра  $U_{t_n}$  и  $U_{t_0}$  и записать их в табл. 4. Следует учитывать, что с помощью термопары определяется *разность* температуры в печи и температуры наружного воздуха. Поэтому к найденным по градуировочной шкале значениям следует прибавить температуру воздуха в лаборатории.

2. Вследствие малой теплопроводности титаната бария, температура образца несколько отличается от температуры воздуха в печи. Поэтому зависимость силы тока от температуры при нагревании и охлаждении будет различной (рис. 9).

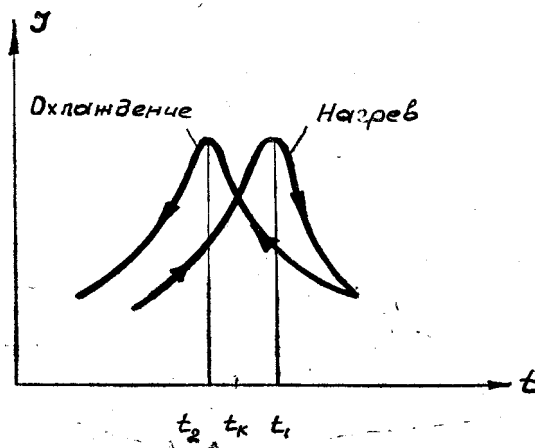


Рис. 9

Обозначим через  $t_1$  и  $t_2$  температуры максимума кривых для нагревания и охлаждения образца. Если считать, что разница между температурой образца и температурой в печи при нагревании и охлаждении будет одинаковой по абсолютной величине, то с достаточной степенью точности можно принять, что значение температуры  $t_k = \frac{t_1 + t_2}{2}$  будет являться точкой Кюри.

Тогда истинная температура образца при нагревании определится по формуле

$$t = t_n + \Delta t_n, \quad (34)$$

где

$$\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{к}} - t_1 = \frac{t_2 - t_1}{2}. \quad (35)$$

Соответственно и при охлаждении

$$t = t_0 + \Delta t_0, \quad (36)$$

где

$$\Delta t_0 = t_{\text{к}} - t_2 = \frac{t_1 - t_2}{2}. \quad (37)$$

Таким образом, результаты измерения температуры, представленные в табл. 4, необходимо скорректировать с учетом  $\Delta t_{\text{н}}$  и  $\Delta t_0$ . Для этого в столбцах  $t$  таблицы записываются значения  $t_{\text{н}} + \Delta t_{\text{н}}$  и соответственно  $t_0 + \Delta t_0$ .

3. По скорректированным данным строится результирующий график зависимости  $I = f(t)$ .

4. Чтобы перейти к зависимости  $\epsilon = f(t)$ , нахождение которой является одной из задач данного упражнения, следует умножить каждую ординату полученного графика  $I = f(t)$  на величину  $k$ , которая находится из уравнения (33):

$$K_{\epsilon} = \frac{d}{U \omega \epsilon_0 S}. \quad (38)$$

Переход от  $I$  к  $\epsilon$  выполняется следующим образом:

а) записать в табл. 5 значения  $I$ , взятые из графика

$I = f(t)$  при различных значениях температуры, которые отличаются друг от друга на  $10^\circ\text{C}$ , а вблизи точки Кюри — на  $5^\circ\text{C}$  (особо выделить точку максимума тока);

б) вычислить коэффициент пропорциональности  $k$  по формуле (38);

в) рассчитать  $\epsilon$  для выбранных значений температуры; результаты расчета записать в табл. 5;

г) построить график зависимости  $\epsilon = f(t)$ .

Таблица 5

$t$	$I$	$\epsilon$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

К заданию 2—1

- Нарисуйте картину силовых линий плоского конденсатора, внутри которого находится металлический шарик.
- Дайте определение величины электрического смещения  $\vec{D}$ . Какая связь между  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$ ?

- Сформулируйте теорему Гаусса для вектора электрического смещения.
- Электрический заряд  $q$  перемещается от одной точки эквипотенциальной поверхности ( $\phi_1$ ) до другой, потенциал которой равен  $\phi_2$ , двумя способами — по нормали и по винтовой линии. В каком случае работа перемещения заряда будет больше?
- Начертите схему установки, используемой в данном задании, и объясните ее действие.

К заданию 2—2

- Объясните, какой физический смысл имеет диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ .
- Начертите электрическую схему установки, используемой в данном задании.
- Как будет влиять на результаты опыта изменение частоты тока в рабочей схеме данной установки?
- Почему электрическая емкость конденсатора зависит от величины  $\epsilon$  диэлектрика, разделяющего его пластины?

К заданию 2—4

- Как устроен абсолютный электрометр? Почему он называется абсолютным?
- Укажите характерные особенности электростатического вольтметра.
- Что является носителем энергии в плоском конденсаторе: заряды или поле?
- Вычислите силу, действующую на каждую из пластин плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами  $100\text{ В}$ , расстояние между пластинами  $d = 10\text{ см}$  и на каждой из пластин находится заряд  $[q] = 2 \cdot 10^{-6}\text{ К}$ .

К заданию 2—10

- В чем состоит отличие процесса поляризации сегнетоэлектрика от процесса поляризации обычного диэлектрика?
- Как бы Вы объяснили зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры?
- Начертите схему установки, используемой в данном задании и поясните ее.
- Укажите характерные особенности сегнетоэлектриков.

## ЛИТЕРАТУРА

- Савельев И. В. Курс общей физики, т. 2. М., «Наука», 1964 и последующие издания, гл. 1, § 5, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 16; гл. 2, § 19; гл. 3, § 24, 25; гл. 4, § 29.
- Яворский Б. М. и др. Курс общей физики, М., «Высшая школа», 1964 и последующие издания, т. 2, гл. 5, § 5.4, гл. 6, § 6.4.