

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

И.Н.Фетисов

## ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

*Методические указания к выполнению лабораторной работы Э -64  
по курсу общей физики*

### ВВЕДЕНИЕ

*Электромагнитное поле* – особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами [1-3]. Электромагнитное поле имеет две переменные составляющие – электрическое поле и магнитное поле, взаимно превращающиеся друг в друга.

Эти поля могут существовать раздельно в виде постоянных полей. Источником постоянного электрического поля, называемого *электростатическим*, или *потенциальным полем* служат неподвижные электрические заряды.

Кроме потенциального поля, существует *вихревое* электрическое поле, возникающее в переменном магнитном поле. Два вида электрического поля имеют существенные различия.

*Цель работы* – ознакомление с законами потенциального поля; в экспериментальной части - измерение зависимости напряжения и энергии от заряда на обкладках конденсатора.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

**Напряженность поля.** Источником потенциального (электростатического) поля служат неподвижные электрические заряды. В данной работе рассматриваются только поля в вакууме. На заряды, находящиеся в поле, действуют силы.

Основной характеристикой электрического поля служит векторная величина  $\vec{E}$  - напряженность поля. Если на помещенный в поле точечный положительный («пробный») заряд  $q$  действует сила  $\vec{F}$  (рис. 1), то поле в данной точке имеет напряженность

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Модуль вектора  $\vec{E}$ , Н/Кл, численно равен силе, действующей на единичный заряд. Примечание: **векторы набраны жирным шрифтом.**

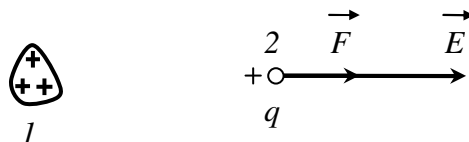


Рис. 1. К определению напряженности электрического поля: 1 – заряды - источник поля; 2 – «пробный» заряд.

**Закон Кулона.** Основным законом электростатики является закон Кулона: два неподвижных точечных заряда взаимодействуют в вакууме с силами, пропорциональными произ-

ведению модулей зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними (рис. 2)

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м (фарад на метр) – электрическая постоянная.

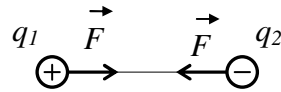


Рис. 2. Закон Кулона

Силы, зависящие только от расстояния между взаимодействующими частицами и направленные по прямой, проходящей через эти частицы, называют *центральными*. Кулоновские силы, а также гравитационные и упругие, являются центральными силами.

Если источником поля служит точечный заряд  $q$ , то напряженность поля в вакууме на расстоянии  $r$  от него равна

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

Легко видеть, что (3) следует из (1) и (2).

**Принцип суперпозиции.** Если поле создается несколькими зарядами (рис. 3) и каждый из них в отдельности в некоторой точке пространства создает поле напряженности  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , то суммарное поле имеет напряженность, определяемую геометрической суммой векторов (принцип суперпозиции электрических полей):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (4)$$

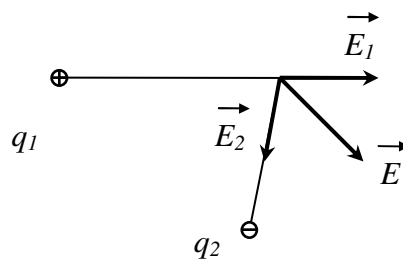


Рис. 3. Принцип суперпозиции электрических полей.

**Линии напряженности.** Электрическое поле можно представить наглядно с помощью линий напряженности, или линий вектора  $E$  (рис. 4). Эти линии проводят так, чтобы касательная к ним в каждой точке совпадала с направлением вектора  $E$ , а густота линий, т. е. число линий, пронизывающих единичную площадку, перпендикулярную линиям в данной точке, была бы пропорциональна модулю вектора  $E$ . Кроме того, этим линиям приписывают направление, совпадающее с направлением вектора  $E$ .

Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных и кончаются на отрицательных зарядах; эти линии не замкнутые.

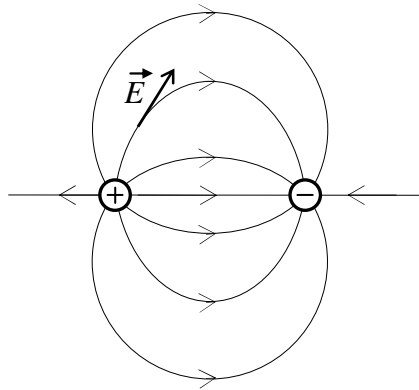


Рис. 4. Линии напряженности

**Поток вектора.** При описании векторных полей (электрического, магнитного и др.) используют характеристику поля – поток.

Поток вектора  $\mathbf{E}$  через элементарную площадку  $dS$  определяется как (рис. 5)

$$d\Phi = E_n dS ,$$

где  $E_n = E \cos\alpha$  – проекция вектора  $\mathbf{E}$  на направление нормали к площадке.

В общем случае неоднородного поля и произвольной поверхности  $S$  поток

$$\Phi = \int_S E_n dS .$$

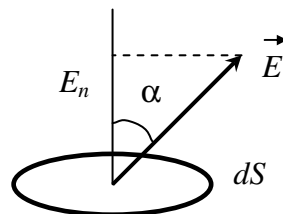


Рис. 5. К определению потока векторной величины

**Теорема Гаусса.** Поток вектора  $\mathbf{E}$  сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охватываемых этой поверхностью, деленной на  $\epsilon_0$

$$\oint_S E_n dS = \frac{q_{\text{ВНУТР}}}{\epsilon_0}$$

Эта формула выражает в интегральной форме теорему Гаусса для вектора  $\mathbf{E}$  в вакууме.

Теорема Гаусса отражает в обобщенной форме свойства электростатического поля: поле создается зарядами (источниками поля) и подчиняется принципу суперпозиции; напряженность поля точечного заряда убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

**Работа сил электрического поля.** Если точечный заряд  $q$  перемещается в электрическом поле, то действующая на него сила  $\vec{F} = q\vec{E}$  совершает работу. Элементарная работа силы на перемещении  $d\vec{l}$  равна скалярному произведению векторов  $\vec{F}$  и  $d\vec{l}$  (рис. 6)

$$dA = (\vec{F}, d\vec{l}) = (q\vec{E}, d\vec{l}) = qE_l dl,$$

где  $E_l = E \cos \alpha$  - проекция вектора  $\vec{E}$  на направление вектора перемещения  $d\vec{l}$ .

Работа сил поля на пути от точки 1 до точки 2 определяется как

$$A = q \int_1^2 E_l dl \quad (5)$$

Этот интеграл берется по некоторой линии (пути), поэтому его называют *линейным*.

Если заряд перемещается по той же траектории в обратном направлении, то знак работы изменяется на противоположный, а модуль работы не изменяется.

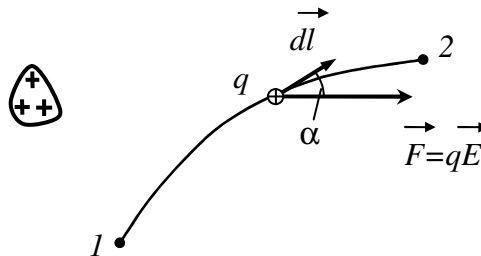


Рис. 6. Работа по перемещению заряда в электрическом поле

**Работа в электростатическом поле.** Электростатическое поле имеет важное свойство - работа (5) в нем не зависит от формы пути (рис. 7): работа на траектории 1a2 равна работе на траектории 1b2. Этим свойством обладают все центральные силы – кулоновские, гравитационные и упругие.

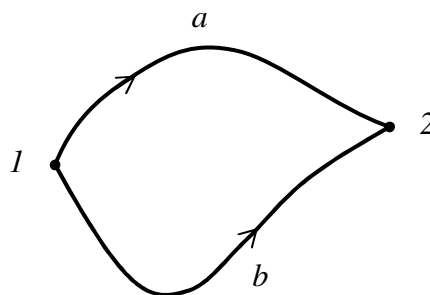


Рис. 7. Работа по перемещению заряда по замкнутой линии

Отсюда следует, что работа консервативных сил на замкнутом пути равна нулю. Это свойство поля отражает интеграл по замкнутой линии, называемый циркуляцией вектора  $\vec{E}$

$$\oint E_l dl = 0 \quad (6)$$

Поле, обладающее свойством (6), называют потенциальным. Значит, любое электростатическое поле, а также поле гравитационных и упругих сил, является потенциальным.

**Потенциал.** Поскольку работа в потенциальном поле не зависит от формы пути, ее представляют как убыль потенциальной энергии  $W_p$  заряда  $q$  при перемещении заряда из точки 1 в точку 2

$$A = q \int_1^2 E_l dl = W_{p1} - W_{p2} \quad (7)$$

Потенциальная энергия  $W_p$  заряда  $q$  зависит от величины заряда. Но если энергию разделить на заряд, получим энергетическую характеристику поля в данной точке, называемую потенциалом

$$\varphi = \frac{W_p}{q} \quad (8)$$

Единица потенциала – вольт,  $V = \text{Дж/Кл}$  (джоуль на кулон).

Подстановкой (8) в (7) получим выражение для работы сил поля при перемещении заряда из точки с потенциалом  $\varphi_1$  в точку с потенциалом  $\varphi_2$

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Величина  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  называется *убылью потенциала*, а  $(\varphi_2 - \varphi_1)$  – *приращением потенциала*. Разность потенциалов называют *напряжением между двумя точками поля*.

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} \quad (9)$$

**Связь напряженности и потенциала.** Напряженность поля (силовая характеристика) и потенциал (энергетическая) связаны между собой. В интегральной форме связь такая

$$\int_1^2 E_l dl = \varphi_1 - \varphi_2$$

а в дифференциальной

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi.$$

**Потенциал точечного заряда.** Рассмотрим два точечных, положительных (т.е. отталкивающихся) заряда  $q$  и  $q_1$ , находящихся в вакууме на расстоянии  $r$  друг от друга. Неподвижный заряд  $q$  примем за источник поля, напряженность которого в месте расположения

второго заряда  $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ . Пусть в этом поле перемещается вдоль линии напряженности

заряд  $q_1$  из исходной точки до бесконечности. Тогда работа сил поля (см. (5)) равна

$$A = \frac{q \cdot q_1}{4\pi\epsilon_0} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{q \cdot q_1}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (10)$$

Эта работа равна убыли потенциальной энергии. Из соображений целесообразности, потенциальную энергию на бесконечности принимают за нуль:  $W_{p2} = 0$ . Тогда из (9) и (10) получаем выражение для потенциала поля точечного заряда на расстоянии  $r$  в вакууме

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (11)$$

Знак потенциала совпадает со знаком заряда.

**Принцип суперпозиции для потенциала.** Если поле создается несколькими зарядами, то в данной точке потенциал равен алгебраической сумме потенциалов от каждого заряда

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n. \quad (12)$$

Эта формула выражает принцип суперпозиции электрического поля, записанный для потенциала.

**Потенциальная энергия точечных зарядов.** Работу (10) рассматривают как потенциальную энергию взаимодействия в вакууме двух точечных зарядов на расстоянии  $r$

$$W_p = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (13)$$

Знак потенциальной энергии зависит от знаков обоих зарядов; энергия положительная для одноименных зарядов и отрицательная – для разноименных.

Формулу (13) можно обобщить на случай произвольного числа точечных зарядов; энергия взаимодействия системы точечных зарядов

$$W_p = \frac{1}{2} \sum_i q_i \varphi_i,$$

где  $\varphi_i$  – потенциал поля в точке расположения заряда  $q_i$  от всех зарядов, кроме  $q_i$ .

**Поле внутри проводника.** Часто заряды располагаются на металлическом проводнике или незаряженный проводник находится в электростатическом поле других зарядов. В этих случаях электроны проводимости так перераспределяются по металлу, что стационарное поле внутри проводника становится равным нулю:  $\mathbf{E} = \mathbf{0}$ . Тогда, как следует из формулы (5), все точки металла имеют одинаковый потенциал.

Из теоремы Гаусса, примененной для замкнутой поверхности внутри проводника, видно, что внутри проводника избыточных зарядов нет. Эти заряды располагаются в тонком поверхностном слое проводника [1-3].

**Емкость конденсатора.** Устройство из двух близко расположенных металлических проводников (обкладок), разделенных изолятором, называют *конденсатором*.

Конденсатор заряжают от источника тока (рис. 8). После замыкания цепи электроны проводимости перемещаются с одной обкладки на другую под действием электрического поля, создаваемого в проводнике источником. При этом одна обкладка приобретает избыточный отрицательный заряд, а другая, которую покинули электроны – такой же положительный заряд  $q$ . Заряды на обкладках создают поле между ними. Одна обкладка имеет потенциал  $\varphi_1$ , другая -  $\varphi_2$ . Разность потенциалов называют напряжением между обкладками  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ .

Напряжение в конденсаторе пропорционально заряду на обкладке

$$U = \frac{q}{C}, \quad (14)$$

где  $1/C$  - коэффициент пропорциональности. Величина

$$C = \frac{q}{U} \quad (15)$$

называется *электроемкостью* (емкостью) конденсатора. Единица емкости – фарад,  $1 \text{ Ф} = \text{Кл/В}$ . Емкость зависит от размеров и формы обкладок, от расстояния между ними, а также от диэлектрической проницаемости диэлектрика между обкладками.

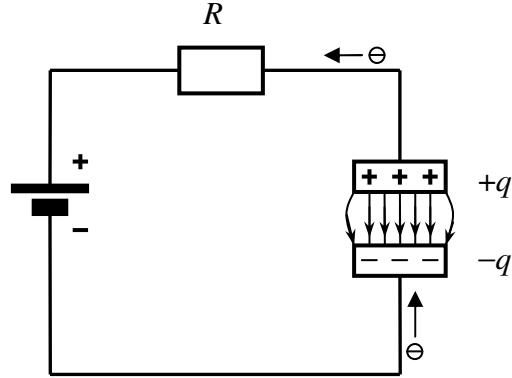


Рис. 8. Схема зарядки конденсатора

Соотношение (14) для конденсатора вытекает из следующих свойств электростатического поля:

- а) равная нулю напряженность поля в проводнике требует определенного распределения заряда на обкладках; поэтому при изменении величины заряда его распределение не изменяется;
- б) принципа суперпозиции;
- в) потенциал в каждой точке поля пропорционален величине точечного заряда (см. (11)), поэтому и разность потенциалов  $U$  пропорциональна заряду.

Соотношение (14) проверяют в лабораторной работе.

**Энергия конденсатора.** Заряженный конденсатор обладает электрической энергией

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad (16)$$

Это выражение получим, рассматривая процесс разряда конденсатора через проводник с некоторым сопротивлением. Пусть при напряжении  $U'$  между обкладками небольшой заряд  $dq'$  переместился с одной обкладки на другую. При этом силы поля совершили элементарную работу, которая перешла в теплоту,

$$dA = U'dq' = \frac{q'}{C} dq'.$$

Проинтегрировав это выражение по  $q'$ , получим суммарную работу сил поля при разряде конденсатора (она же равна энергии конденсатора)

$$A = W = \frac{q^2}{2C}.$$

**Энергия электрического поля.** Выше мы рассматривали потенциальную энергию взаимодействия зарядов посредством электрического поля. Эту энергию имеет само поле.

Если в объеме  $dV$  энергия поля равна  $dW$ , то объемная плотность энергии поля  $w$ , Дж/м<sup>3</sup>,

$$w = \frac{dW}{dV}.$$

В вакууме объемная плотность энергии

$$w = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}.$$

Объемная плотность энергии пропорциональна квадрату напряженности поля.

**Динамические процессы в цепи с конденсатором.** Рассмотрим процессы зарядки и разрядки конденсатора в схеме на рис. 9. Конденсатор емкости  $C$  заряжают от источника тока ЭДС  $\mathcal{E}$  через сопротивление  $R$  (рис. 9, а). По цепи протекает ток  $I$ . В любой момент вре-

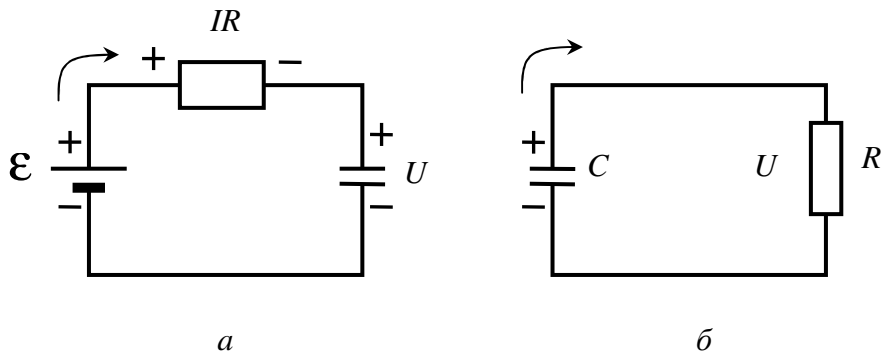


Рис. 9. Конденсаторные цепи: а) зарядка; б) разрядка

мени сумма напряжений  $U$  - на конденсаторе и  $IR$  - на сопротивлении равна ЭДС:  $\mathcal{E} = U + IR$ . В процессе зарядки напряжение на конденсаторе растет, а на сопротивлении – падает. Поэтому ток в начале зарядки имеет максимальное значение  $I_0 = \mathcal{E} / R$ , а дальше он убывает. Расчеты показывают, что ток уменьшается по экспоненте (рис. 10, а)

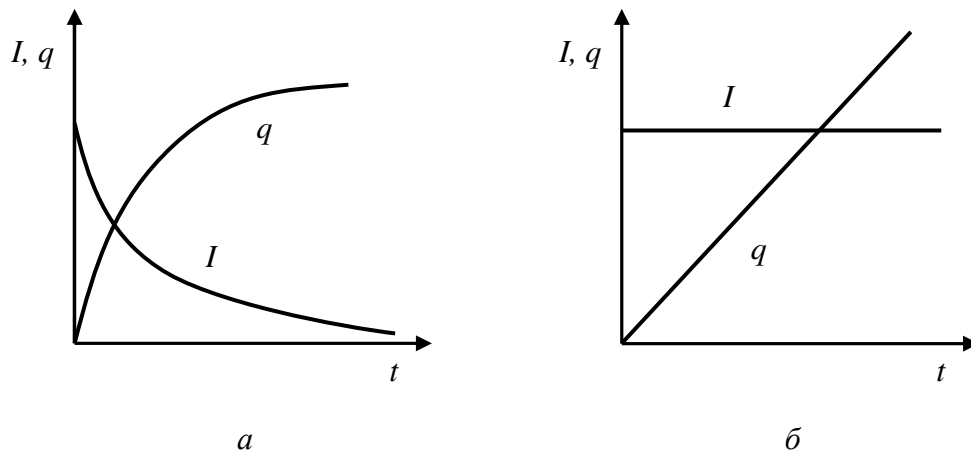


Рис. 10. Зарядка конденсатора: а) от источника постоянного напряжения; б) от источника постоянного тока.  $I$  – сила тока,  $q$  – заряд на обкладке.



$$I = I_0 \exp(-t/\tau), \quad (17)$$

а заряд конденсатора - возрастает (рис. 10, а)

$$q = C \mathcal{E} (1 - \exp(-t/\tau)). \quad (18)$$

Величина

$$\tau = R \cdot C \quad (19)$$

называется временем релаксации.

Если к заряженному до напряжения  $\mathcal{E}$  конденсатору подключить сопротивление  $R$  (рис. 9, б), ток разряда будет уменьшаться по формуле (17), а напряжение, пропорциональное току, - по такому же закону

$$U = \mathcal{E} \exp(-t/\tau). \quad (20)$$

За время разрядки, равное  $\tau$ , напряжение уменьшается в  $e \approx 2,72$  раза, а энергия конденсатора, пропорциональная квадрату напряжения - в  $e^2 \approx 7,4$  раза.

В главном опыте данной работы используется другой режим зарядки конденсатора, а именно, стабильным в процессе зарядки током  $I = \text{const}$ . Для этого применяется специальный источник тока с электронной стабилизацией. В этом случае заряд (и напряжение) конденсатора увеличиваются пропорционально времени (рис. 10, б)

$$q = It \quad (21)$$

Такой режим позволяет определить заряд конденсатора, зная силу тока и время зарядки.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Демонстрация процессов зарядки и разрядки конденсатора, а также энергии в заряженном конденсаторе.

Схема блока №2 «Демонстрация работы конденсатора» показана на рис. 11. Лампа служит индикатором тока, а ее свечение при разряде конденсатора демонстрирует запасенную в нем электрическую энергию.

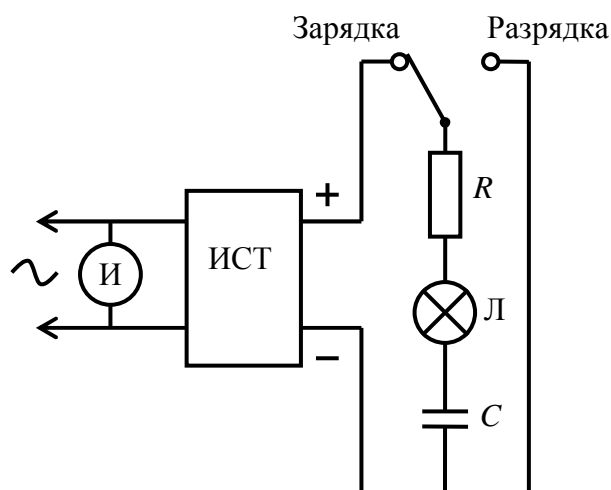


Рис. 11. Установка для демонстрации работы конденсатора:

И – индикатор сетевого напряжения; ИСТ – источник постоянного напряжения 30 В;  $C = 0,022$  Ф;  $R = 110$  Ом; Л – лампа накаливания на напряжение 24 В и ток 0,1 А.

Зарядка конденсатора от источника постоянного напряжения будет происходить по экспоненциальному закону (см. (18) и рис. 10, а), а разрядка – по зависимости (20).

#### **Порядок выполнения задания.**

1. Установить переключатель в положение «РАЗРЯДКА».
2. Источник питания включить в сеть вилкой, при этом должен загореться световой индикатор «СЕТЬ».
3. Установить тумблер в положение «ЗАРЯДКА». При этом через лампу потечет зарядный ток. По яркости свечения лампы можно судить о величине тока. Объяснить, почему в процессе зарядки сила тока убывает?
4. Переключить тумблер в положение «РАЗРЯДКА» и наблюдать свечение лампы за счет энергии конденсатора при его разрядке. При этом источник питания не работает, в чем можно убедиться, отключив его от сети.
5. Повторить опыт. Измерить время, в течение которого наблюдается свечение лампы при зарядке и при разрядке конденсатора. Результаты записать в табл. 1.

#### **Демонстрационная установка**

Таблица 1

Примерное время зарядки (разрядки), с	$\tau = RC$ , с

6. Вычислить время релаксации  $\tau$  (см. (19)), где  $R$  – полное сопротивление, включающее сопротивление резистора 110 Ом и сопротивление лампы. Сопротивление лампы вычислить, исходя из параметров лампы – напряжения 24 В и силы тока 0,1 А. Считать, что сопротивление лампы не зависит от силы тока. Результаты вычисления  $\tau$  записать в табл. 1.

7. Сравнить расчетное время  $\tau$  с результатами измерений. Сделать выводы.

## **2. Методика изучения потенциального поля**

В опыте проверяют следующие выводы теории для конденсатора: напряжение между обкладками пропорционально заряду (см. (14)), а энергия пропорциональна квадрату заряда (см. (16)).

Эти выводы базируются на следующих положениях. Источником потенциального поля являются заряды. При зарядке конденсатора электроны перемещаются по проводам с

одной обкладке на другую, создавая на обкладках равные заряды противоположного знака. Заряды создают в конденсаторе электрическое поле, количественной характеристикой которого служит напряжение между обкладками. Поле обладает энергией. Объемная плотность энергии пропорциональна квадрату напряженности, или квадрату напряжения (или заряда) конденсатора.

Схема лабораторной установки показана на рис. 12. Батарею конденсаторов большой емкости  $C$  заряжают от источника тока «ИСТ» в положении 2 переключателя. Источник, имеющий электронную регулировку, создает стабильный ток зарядки ( $I = \text{const}$ ) на протяжении всей зарядки до 30 В. Силу тока измеряют амперметром  $A$ , а напряжение конденсатора  $U$  – вольтметром  $V$ . Заряд на обкладке определяют по формуле  $q = I t$ , где  $t$  – время зарядки, составляющее десятки секунд.

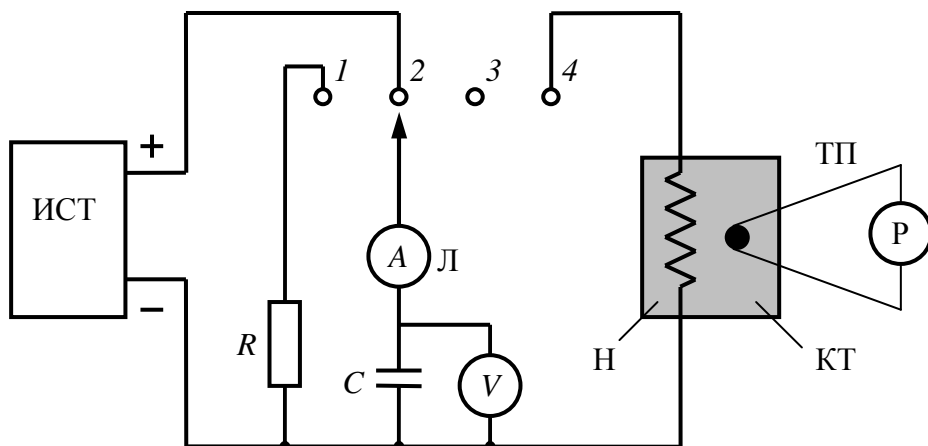


Рис. 12. Схема установки для изучения потенциального поля:

ИСТ – источник стабильного тока;  $A$  – амперметр;  $V$  – вольтметр;  $H$  – нагреватель калориметра;  $КТ$  – нагреваемое калориметрическое тело;  $ТП$  – термопара;  $P$  – прибор для измерения температуры.

Положения переключателя: 1 – разрядка конденсатора перед очередным измерением, 2 – зарядка конденсатора, 3 – окончание зарядки и измерение напряжения, 4 – измерение энергии конденсатора калориметром

По результатам измерений строят графическую зависимость  $U$  от  $q$  и сравнивают ее с теорией (см. (14)), а также находят емкость конденсатора.

Энергию конденсатора измеряют с помощью калориметра – прибора для измерения количества теплоты, выделяющейся или поглощающейся в к.-л. физическом, химическом или биологическом процессе.

Калориметр (см. рис. 12) состоит из небольшой металлической пластинки  $КТ$  (тела калориметра) с нагревательной спиралью  $H$  и электрического термометра – термопары  $ТП$  с регистрирующим прибором  $P$ .

Для измерения энергии  $W$  конденсатора его разряжают через нагреватель калориметра и измеряют приращение температуры  $\Delta T$  вещества калориметра. Процесс происходит быстро, поэтому теплота идет на нагревание калориметра; теплоотдачей окружающим телам можно пренебречь.

Выделившаяся теплота  $Q$ , равная  $W$ , и приращение температуры связаны соотношением

$$W = Q = C_T \Delta T, \quad (22)$$

где  $C_T$ , Дж/К – теплоемкость нагреваемого тела. Приращение температуры измеряют термодпарой.

Величину  $\Delta T$  принимают за энергию конденсатора в условных единицах и проверяют ее зависимость от заряда.

### 3. Ознакомление с прибором № 1 и задание зарядного тока

Установка № 1 «Потенциальное поле» показана на рис. 13. В качестве малоинерционного калориметра 2 используется переменный резистор в алюминиевом корпусе 13x13x5 мм.

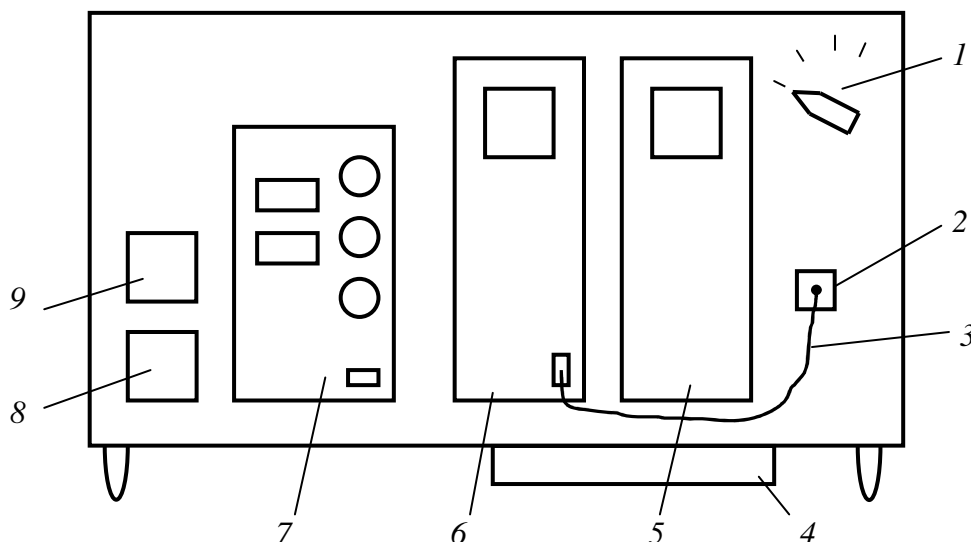


Рис. 13. Установка № 1 «Потенциальное поле»:

1 – переключатель режима измерений; 2 – калориметр; 3 – термопара; 4 – конденсаторы; 5 – мультиметр – прибор для измерения тока и напряжения; 6 – прибор для измерения температуры калориметра; 7 – источник стабильного тока для зарядки конденсаторов; 8 – выключатель «СЕТЬ»; 9 – блок питания вентилятора на 12 В

Внутри корпуса находится проволочное сопротивление 25 Ом, имеющее хороший тепловой контакт с алюминием. К корпусу прижата термопара 3, подключенная к регистрирующему прибору 6.

*Термопара* – электрический термометр. Она состоит из двух разнородных проводов, изготовленных из специальных сплавов. Спай проводов прижат к калориметру. При нагревании спая на концах проводов возникает напряжение, пропорциональное приращению температуры.

Переключателем 1 на четыре положения устанавливают режим работы установки. Установку включают выключателем 8 «СЕТЬ». При этом включается батарейное питание измерительных приборов и источник 9 постоянного напряжения 12 В для работы вентилятора.

#### Порядок выполнения задания.

1. Зарисовать в отчете электрическую схему установки (см. рис. 12).

2. Переключатель 1 (см. рис. 13) установить в положение 1.

3. Подключить установку к сети двумя вилками. Включить выключатель 8 «СЕТЬ».

При этом должны заработать измерительные приборы и вентилятор.

4. Прибор 6 установлен в режим измерения температуры калориметра. Прибором 5 измеряют зарядный ток  $I$  в амперах по верхней шкале и напряжение на конденсаторе  $U$  в вольтах – по нижней шкале.

5. Источник питания 7 включить тумблером «POWER» с подсветкой.

6. Ручки «VOLTAGE» и «FINE» источника повернуть по часовой стрелке до упора. В этом режиме конденсатор можно зарядить до максимального напряжения 30 В. Это положение не изменять в течение всей лабораторной работы.

7. Ручку «CURRENT» повернуть до конца против часовой стрелки, при этом ток источника минимальный или равен нулю.

8. Переключатель 1 на рис. 13 поставить в положение 2 – зарядка конденсатора. Медленно вращая ручку «CURRENT», установить зарядный ток примерно 0,1 А. Ток контролировать прибором 5 по верхней шкале. Примечание. Измерительные приборы источника питания менее точные и в работе не используются.

9. Если за время зарядки ток не был установлен, процедуру повторить. Для этого сначала разряжают конденсатор в положении 1 переключателя, затем снова заряжают.

Внимание! После установки тока ручку «CURRENT» не трогать.

10. Система стабилизации тока не вполне совершенна и в процессе зарядки ток немного уменьшается. Измерить ток в начале и конце зарядки при напряжении примерно 25 В. Результаты измерений записать в табл. 2. Вычислить среднее значение тока.

Таблица 2

Зарядный ток

В начале зарядки	В конце зарядки	Средний ток $I$ , А

11. Закончив измерения тока, установить переключатель в первое положение.

#### 4. Изучение зависимости напряжения и энергии конденсатора от величины заряда

Каждое измерение включает следующую последовательность, изменяемую переключателем на четыре положения (см. рис. 12):

1 - разрядка («обнуление») конденсатора и охлаждение калориметра вентилятором;

2 - зарядка конденсатора стабильным током в течение определенного времени;

3 - окончание зарядки и измерение напряжения конденсатора;

4 - разрядка конденсатора через калориметр и измерение приращения температуры.

##### *Порядок выполнения задания.*

1. Подготовить табл. 3.

#### Результаты измерений

Таблица 3

$t$ , с	$U$ , В	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$\Delta T$ , °С	$q = I t$ , Кл	$q^2$ , Кл <sup>2</sup>
20						
30						
далее увеличивать на 10 с						

Примечание. В таблице должно быть примерно 7 строк

2. Подготовить свои часы с секундной шкалой.

3. Установить переключатель в положение 1. Если конденсатор был заряжен, он будет разряжаться. Достаточно разрядить его до напряжения менее 0,1 В.

Если калориметр был нагрет, он будет охлаждаться вентилятором до комнатной температуры. Если температура не уменьшается, значит она – комнатная.

4. Измерить температуру  $T_1$  калориметра. Результат записать в табл. 3.

5. Включить зарядку конденсатора точно на 20 с. Закончить зарядку в положении 3 переключателя.

6. Измерить напряжение  $U$  конденсатора мультиметром по нижнему индикатору. Результат измерения записать в табл. 3.

7. Перевести переключатель в положение 4 для измерения энергии и внимательно следить за индикатором термометра. Максимальную температуру  $T_2$  записать в табл. 3.

8. Установить переключатель в положение 1. Цикл измерения закончен. Калориметр охлаждается вентилятором. Следующее измерение можно выполнять, если температура калориметра превышает комнатную не более, чем на 0,5 – 1 градус. Конденсатор должен разрядиться до напряжения менее 0,1 В.

9. Повторить измерения п. п. 3 - 8, увеличивая каждый раз время зарядки на 10 с. Максимальное время зарядки соответствует напряжению конденсатора около 30 В. Зарядить до большего напряжения источник не может.

10. Внимание! Выключить источник питания тумблером «POWER», а измерительные приборы – выключателем 8 «СЕТЬ».

### Порядок обработки результатов измерений.

1. По результатам измерений вычислить и записать в табл. 3 следующие величины: приращение температуры  $\Delta T = T_2 - T_1$ , заряд  $q$  и квадрат заряда  $q^2$ .

2. Построить на миллиметровой бумаге графическую зависимость  $U$  от  $q$ . Через отчетливо нанесенные экспериментальные точки и начало координат провести наилучшую «на глаз» прямую.

3. Полученные результаты сравнить с (14). Сделать выводы.

4. Используя полученный график, определить емкость конденсатора, равную отношению заряда  $q$  к напряжению  $U$  для какой-либо точки, лежащей на проведенной прямой. Точность будет выше, если точка соответствует большому значению заряда. Результат записать в табл. 4.

5. Построить на миллиметровой бумаге графическую зависимость  $\Delta T$  от  $q^2$ . Величина  $\Delta T$  пропорциональна энергии конденсатора (см. (22)). Через отчетливо нанесенные экспериментальные точки и начало координат провести наилучшую «на глаз» прямую.

### Характеристики конденсатора

Таблица 4

$C, \Phi$	$q_{\max}, \text{Кл}$	$W_{\max}, \text{Дж}$	$h, \text{м}$

6. Полученную зависимость сравнить с (16). Сделать выводы.

7. Для напряжения 30 В вычислить заряд и энергию конденсатора, имеющие максимальные значения в опыте. Результат записать в табл. 4.

7. Если всю энергию конденсатора затратить на подъем груза массой 1 кг, вычислить высоту подъема  $h$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое напряженность электрического поля?
2. Объясните принцип суперпозиции.
3. Что утверждает теорема Гаусса?
4. Каким свойством обладает потенциальное электрическое поле?
5. Что такое потенциал и напряжение?
6. Что такое конденсатор и его емкость?
7. Чему равна энергия заряженного конденсатора?
8. Написать выражение для объемной плотности энергии электрического поля.
9. Каково устройство калориметра? Объяснить методику измерения энергии конденсатора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество: Учебное пособие. -М.: Наука. 1985.-576с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. т.2.- М.: Наука. 1978.-480 с.
3. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: Учеб. пособие для вузов. -М.: Высш. шк., 1983.-279 с.