

И.Н.Фетисов

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

*Методические указания к выполнению лабораторной работы Э -60
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 порождающие друг друга. Эти поля можно получить отдельно, но только в виде постоянных полей. Источником постоянного электрического поля, называемого *электростатическим*, или *потенциальным*, служат неподвижные электрические заряды.

Электромагнитное поле обладает энергией. В данной работе рассматривается электростатическое поле, энергию которого легче всего изучать с помощью конденсатора. В конденсаторе можно сосредоточить большую электрическую энергию, которую легко превратить в другую форму – тепловую или механическую.

Цель работы – ознакомление с электростатическим полем; измерение энергии электрического поля конденсатора с помощью калориметра.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Электрическое потенциальное поле

Электрическое потенциальное поле в каждой точке пространства характеризуют вектором \mathbf{E} (*напряженность* поля) и скалярной величиной φ , называемой *потенциалом*. Напряженность поля – силовая характеристика, а потенциал – энергетическая.

Если на помещенный в поле точечный положительный заряд q (“пробный” заряд) действует сила \mathbf{F} (рис. 1), то поле в данной точке имеет *напряженность*

$$\mathbf{E} = \mathbf{F} / q. \quad (1)$$

Модуль вектора E , Н/Кл, численно равен силе, действующей на единичный заряд.

Примечание: векторы набраны жирным шрифтом.

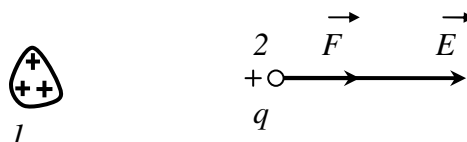


Рис. 1. К определению напряженности электрического поля: 1 – заряды - источник поля; 2 – «пробный» заряд.

Основным законом электростатики является *закон Кулона*: два неподвижных точечных заряда взаимодействуют в вакууме с силами, пропорциональными произведению модулей зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними

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

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

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

$$E = q / (4 \pi \epsilon_0 r^2). \quad (3)$$

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

Если поле создается несколькими зарядами (рис. 2) и каждый из них в отдельности в некоторой точке пространства создает поле напряженности $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_n$, то суммарное поле имеет напряженность, определяемую геометрической суммой векторов (*принцип суперпозиции* электрического поля):

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n.$$

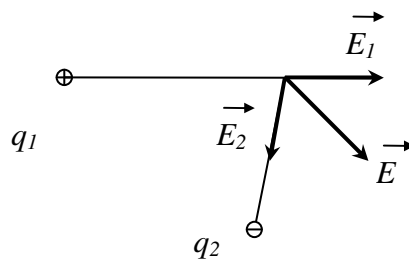


Рис. 2. Принцип суперпозиции электрических полей.

Если в поле «обычных» зарядов (их называют *сторонними*) находится диэлектрик, то он *поляризуется* [1-3]. В этом случае поле создается зарядами двух различных видов – *сторонними* и *связанными* (внутри молекулярного диполя), причем поле становится слабее, чем было в вакууме. Расчет поля в диэлектрике рассматривается в [1-3]. В простом случае, когда точечный заряд q находится в однородном, протяженном диэлектрике, напряженность поля уменьшается в ϵ раз

$$E = q / (4 \pi \epsilon \epsilon_0 r^2), \quad (4)$$

где ϵ – характеристика данного диэлектрика, его *диэлектрическая проницаемость*.

Если точечный заряд q перемещается в электрическом поле, то действующая на него сила $\mathbf{F} = q \mathbf{E}$ совершает работу. Элементарная работа силы на перемещении $d\mathbf{l}$ равна (рис. 3)

$$dA = \mathbf{F} d\mathbf{l} = q \mathbf{E} d\mathbf{l} = q E d l \cos \alpha,$$

а вся работа сил поля на пути от точки 1 до точки 2 определяется как

$$A = q \int \mathbf{E} d\mathbf{l}. \quad (5)$$

Этот интеграл берется по некоторой линии (пути).

Силы, действующие на заряд в электростатическом поле, являются *консервативными силами*, для них работа (5) не зависит от формы пути, а работа по замкнутому пути - равна нулю. Такое поле называют *потенциальным* электрическим полем. Источником по-

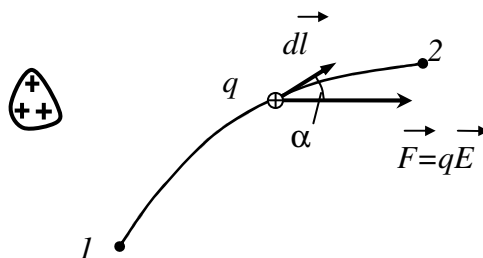


Рис. 3. Работа при перемещении заряда в электрическом поле.

тенциального поля служат электрические заряды.

Кроме потенциального, имеется *вихревое электрическое* поле [1-3], возникающее в переменном магнитном поле. Линии вихревого поля – замкнутые, а работа в нем по замкнутой линии не равна нулю.

Поскольку работа (5) 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

$$A = q \int \mathbf{E} d\mathbf{l} = W_{p1} - W_{p2}. \quad (6)$$

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

$$\varphi = W_p / q. \quad (7)$$

Единица потенциала – *вольт*, В = Дж/Кл (джоуль на кулон).

Подстановкой (7) в (6) получим выражение для работы сил поля при перемещении заряда из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2

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

Разность потенциалов называют *напряжением* между двумя точками поля

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = A/q.$$

Рассмотрим два точечных, положительных (т.е. отталкивающих) 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

$$E = q / (4\pi \epsilon_0 r^2).$$

Пусть в этом поле перемещается вдоль линии напряженности заряд q_1 из исходной точки до бесконечности. Тогда работа сил поля (см. (6)) равна

$$A = q q_1 / (4\pi \epsilon_0) \int dr/r^2 = q q_1 / (4\pi \epsilon_0 r). \quad (8)$$

Эта работа равна убыли потенциальной энергии. Из соображений целесообразности, потенциальную энергию на бесконечности принимают за нуль: $W_{p2} = 0$. Тогда из (6) и (8) получаем выражение для потенциала поля точечного заряда на расстоянии r в вакууме

$$\varphi = q / (4\pi \epsilon_0 r). \quad (9)$$

Знак потенциала совпадает со знаком заряда.

Если поле создается несколькими зарядами, то в данной точке потенциал равен алгебраической сумме потенциалов от каждого заряда (*принцип суперпозиции полей*)

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n.$$

Работу в (8) можно рассматривать как *потенциальную энергию взаимодействия* в вакууме двух точечных зарядов на расстоянии r

$$W_p = q_1 q_2 / (4 \pi \epsilon_0 r). \quad (10)$$

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

Формулу (10) можно обобщить на случай произвольного числа точечных зарядов; энергия взаимодействия системы точечных зарядов

$$W_p = (1/2) \sum q_i \varphi_i, \quad (11)$$

где φ_i – потенциал поля в точке расположения заряда q_i от всех зарядов, кроме q_i .

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: $\mathbf{E} = 0$. Тогда, как следует из формулы (6), все точки металла имеют одинаковый потенциал.

Применяя теорему Гаусса для поля внутри проводника, можно показать, что внутри проводника избыточных зарядов нет, они находятся в тонком поверхностном слое проводника [1-3].

2. Энергия электрического поля, конденсаторы, емкость

Конденсатором называют устройство из двух близко расположенных металлических проводников (обкладок), разделенных изолятором.

Конденсатор заряжают от источника тока (рис. 4). После замыкания цепи электроны проводимости перемещаются с одной обкладки на другую под действием электрического поля, создаваемого в проводнике источником. При этом одна обкладка приобретает

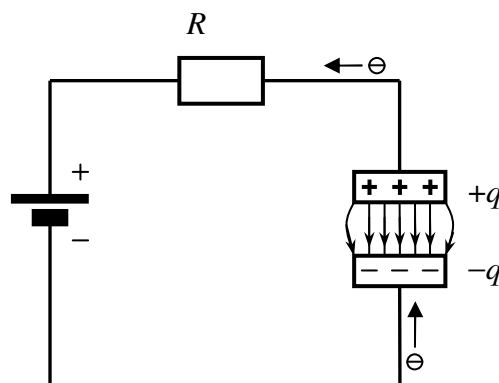


Рис. 4. Схема зарядки конденсатора.

избыточный отрицательный заряд, а другая, из которой ушли электроны, – такой же положительный заряд q . Заряды на обкладках создают поле между ними. Накопление заряда

происходит до тех пор, пока напряжение между обкладками не сравняется с ЭДС источника.

Емкостью (емкостью) конденсатора называют отношение заряда на одной обкладке к напряжению между обкладками

$$C = q / U. \quad (12)$$

Единица емкости – *фарад*: Ф = Кл/В (кулон на вольт).

Плоский конденсатор состоит из двух параллельных пластин площади S каждой, разделенных зазором малой ширины d . Емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S/d, \quad (13)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего зазор между обкладками.

Заряженный конденсатор обладает электрической энергией

$$W = qU/2 = CU^2/2 = q^2/(2C). \quad (14)$$

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

$$dA = U' dq' = (q'/C) dq'.$$

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

$$A = W = q^2/2C.$$

В (11) мы рассматривали потенциальную энергию взаимодействия зарядов посредством электрического поля. Эту энергию имеет само поле и энергия зависит от напряженности поля. Рассмотрим однородное поле плоского конденсатора. Подставляя в формулу $W = CU^2/2$ выражение (13), получим

$$W = \varepsilon \varepsilon_0 S U^2 / (2d) = (1/2) \varepsilon \varepsilon_0 (U/d)^2 Sd.$$

В однородном поле плоского конденсатора напряженность поля равна $E = U/d$.

Произведение Sd равно объему V между обкладками конденсатора, в котором сосредоточено поле. Тогда энергия однородного поля напряженности E в объеме V

$$W = (\varepsilon \varepsilon_0 E^2 / 2) V.$$

Объемная плотность энергии электрического поля, Дж/м³,

$$w = W/V = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 / 2.$$

В случае неоднородного поля полная энергия поля равна интегралу по объему, в котором есть поле,

$$W = \int (\varepsilon \varepsilon_0 E^2 / 2) dV.$$

Процессы зарядки и разрядки конденсатора занимают некоторое время τ , зависящее от произведения емкости на сопротивление цепи:

$$\tau = RC. \quad (15)$$

Величина τ , с = Ом·Ф, называется *временем релаксации*. При разряде конденсатора напряжение уменьшается по закону

$$U = U_0 \exp(-t/\tau),$$

где U_0 – начальное напряжение. При зарядке конденсатора от источника с ЭДС U_0 напряжение возрастает по закону

$$U = U_0 (1 - \exp(-t/\tau)).$$

За время разрядки, равное τ , напряжение уменьшается в $e = 2,72$ раза, а за время 10τ – уменьшается в $e^{10} = 22\,000$ раз.

Несколько опытов выполняются в данной работе с конденсатором емкости 22 мкФ, который разряжают (и заряжают) через сопротивление 100 Ом, при этом $\tau = 2 \cdot 10^{-3}$ с; следовательно, за время 0,02 с конденсатор практически полностью разрядится. Верно также, что за это время он полностью зарядится.

3. Измерение энергии электрического поля конденсатора калориметром

Калориметр – прибор для измерения количества теплоты, выделяющейся или поглощающейся в к.-л. физическом, химическом или биологическом процессе. Конструкции калориметров разнообразны и определяются характером изучаемых процессов.

В данной работе с помощью калориметра измеряют энергию заряженного конденсатора и проверяют зависимость энергии от напряжения.

Калориметр содержит три основных элемента:

- нагреватель (резистор), через который разряжают конденсатор и в котором электрическая энергия конденсатора полностью превращается в теплоту;
- нагреваемое калориметрическое тело;
- термометр для измерения приращения температуры тела, пропорционального количеству выделившейся теплоты.

В калориметре, разработанном на кафедре физики МГТУ им. Баумана [4], используется специальная лампа (рис. 5), которую будем называть *калориметрической лампой*, или *калориметром*. В стеклянном баллоне Б с разреженным газом находится нагреваемое калориметрическое тело КТ, содержащее электрический нагреватель Н и электрический термометр - терморезистор ТР.

Терморезистор представляет собой крошечную бусинку из полупроводника с двумя металлическими выводами. Сопротивление терморезистора сильно зависит от температуры – при возрастании температуры на 1 °С сопротивление уменьшается на несколько процентов. Поэтому малые изменения температуры легко измерять терморезистором.

Размер нагреваемого калориметрического тела всего примерно 1 мм, поэтому его теплоемкость и тепловая инерция очень малы.

Разряд конденсатора происходит практически мгновенно. Выделившаяся теплота Q быстро "перемешивается" по нагреваемому сплошному телу. За малое время перемешивания теплота не уходит наружу, а только повышает температуру тела на величину ΔT . Теплота и приращение температуры связаны соотношением

$$Q = C_T \Delta T, \quad (16)$$

где C_T , Дж/К, – теплоемкость нагреваемого тела калориметра.

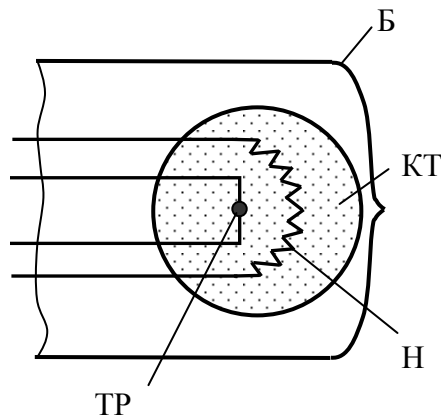


Рис. 5. Калориметрическая лампа: Б – стеклянный баллон; КТ – калориметрическое тело размером примерно 1 мм; Н – нагревательная спираль; ТР – терморезистор (термометр).

При малых ΔT приращение сопротивления терморезистора пропорционально изменению температуры

$$\Delta R = \alpha \Delta T, \quad (17)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Небольшое изменение сопротивления ΔR преобразуют с помощью специальной электрической схемы в «сигнальное» напряжение n , пропорциональное изменению сопротивления

$$n = \beta \Delta R. \quad (18)$$

Сигнальное напряжение после усиления измеряют аналоговым (стрелочным) прибором, его считывают в делениях шкалы n .

Объединяя формулы (16) – (18), получим

$$Q = k n,$$

где $k = C_T / (\alpha \beta)$ – коэффициент пропорциональности.

Поскольку теплота равна энергии конденсатора W , имеем

$$W = Q = k n. \quad (19)$$

Сигнальное напряжение n – есть энергия конденсатора в условных единицах, которые после градуировки пересчитывают в джоули. Для этого конденсатор емкости C , заряженный до напряжения U , разряжают через нагреватель калориметра и измеряют n . Тогда k находят из формулы

$$W = CU^2 / 2 = k n. \quad (20)$$

Для проверки формулы (14) измеряют n при различном напряжении U конденсатора, по формуле (19) вычисляют энергию в джоулях и строят графическую зависимость W от U^2 . Эта зависимость должна быть линейной.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная установка состоит из калориметра, источника питания и нескольких электрических схем (пронумерованных блоков) для выполнения заданий.

Задание 1. Продемонстрировать процессы зарядки и разрядки конденсатора, а также наличие энергии в заряженном конденсаторе.

Ознакомиться с установками.

В этом задании используется блок № 3. Конденсатор большой емкости ($C = 0,022$ Ф) заряжают и разряжают через лампу накаливания (24 В x 0,1 А). Лампа ограничивает ток, служит индикатором тока, а ее свечение при разряде конденсатора демонстрирует наличие энергии, запасенной в конденсаторе.

Блок питания (№ 2) состоит из двух последовательно включенных источников. Напряжение каждого из них можно изменять от 0 до 15 В ручками «ГРУБО» и «ТОЧНО» и измерять встроенным вольтметром. Выходное напряжение блока на проводниках с вилками равно сумме показаний двух вольтметров.

Блок питания соединяют с блоком №3 (или другими устройствами) двумя проводниками с вилками; красный провод имеет полярность «+».

Внимание! Перед подключением (или отсоединением) блока питания от схем снять напряжение на выходных проводах тумблером «ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ», не выключая сетевого питания источников.

Порядок выполнения задания.

1. По правилам техники безопасности источники питания должны быть заземлены. Клемма заземления находится на крепежной доске слева. Проверить наличие заземления. При его отсутствии - обратиться к дежурному.

2. Выключить тумблер «ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».

3. Подключить источник к входным гнездам блока № 3. Красный провод должен быть соединен с клеммой «+» блока № 3 (*Примечание:* конденсаторы большой емкости, называемые электролитическими, работают при определенной полярности на обкладках).

4. Тумблер в блоке № 3 установить в положение «РАЗРЯДКА».

5. Включить сеть двух источников кнопками «СЕТЬ».

6. Ручками «ГРУБО» и «ТОЧНО» установить суммарное напряжение двух источников 24 В.

7. Включить тумблер «ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».

8. В блоке № 3 установить тумблер в положение «ЗАРЯДКА». При этом через лампу начинает протекать зарядный ток, по яркости свечения лампы можно судить о величине тока. Объяснить, почему в процессе зарядки сила тока убывает?

После того, как свечение лампы прекратится, небольшой зарядный ток еще некоторое время протекает. Поэтому до полной зарядки продолжать процесс в течение примерно двадцати секунд.

9. Переключить тумблер в положение «РАЗРЯДКА» и наблюдать свечение лампы за счет энергии конденсатора при его разрядке. При этом источники питания не работают, в чем можно убедиться, выключив тумблер «ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».

10. Повторить опыт. Измерить время, в течение которого наблюдается свечение лампы при зарядке и при разрядке конденсатора. Результаты записать в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики демонстрационной установки

$q = C U$, Кл	W , Дж	Примерное время зарядки (разрядки), с	$\tau = R C$, с
----------------	----------	---------------------------------------	------------------

--	--	--	--

11. Вычислить максимальные значения заряда q и энергии W конденсатора в опыте. Результаты записать в табл. 1.

12. Вычислить постоянную времени τ (см. (15)). Считать, что сопротивление лампы не зависит от силы тока. Результаты записать в табл. 1.

13. Сравнить расчетное время τ с измеренным. Сделать выводы.

Задание 2. Ознакомиться с калориметром.

Электрическая схема калориметра показана на рис. 6. Внутри крошечного калориметрического тела КТ находятся нагреватель Н сопротивлением 100 Ом и терморезистор

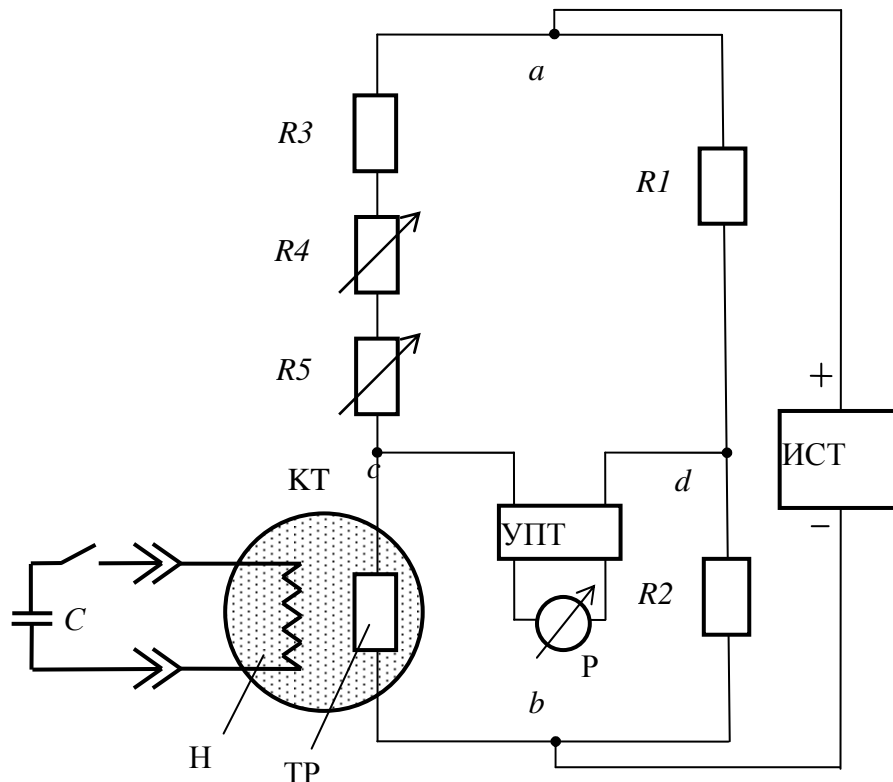


Рис. 6

(термометр) ТР сопротивлением 33 кОм. Терморезистор включен в схему, содержащую четыре плеча из резисторов, источник питания «ИСТ», усилитель постоянного тока «УПТ» и показывающий прибор Р. Эта схема преобразует небольшое изменение сопротивления ТР при нагревании калориметра в выходной сигнал калориметра.

Схема работает следующим образом. Перед каждым измерением энергии конденсатора показывающий стрелочный прибор должен быть на нуле. Этого добиваются вращением ручек «УСТАНОВКА НУЛЯ» (грубо и точно), которыми изменяют сопротивление переменных резисторов R_4 и R_5 настолько, чтобы потенциалы точек c и d стали одинаковыми.

Затем конденсатор C разряжают через нагреватель Н, температура калориметра повышается на ΔT , а сопротивление ТР уменьшается на ΔR . Вследствие этого потенциал точки c понижается, а точки d остается неизменным (потенциал отсчитываем от точки b). Поэтому между точками c и d возникает сигнальное напряжение. При разряде конденсатора стрелка показывающего прибора быстро отклоняется, максимальное отклонение n (в делениях шкалы) записывают. Оно пропорционально энергии конденсатора. Сразу после отклонения стрелка возвращается назад, поскольку калориметр охлаждается.

Порядок выполнения задания.

1. Ознакомиться с калориметром (блок №1). Калориметрическая лампа 1 расположена в камере с прозрачной крышкой (рис. 7). Нагреватель калориметра соединяют с конденсатором кабелем с разъемом 2. Ручками 5 «УСТАНОВКА НУЛЯ ГРУБО И ТОЧНО»

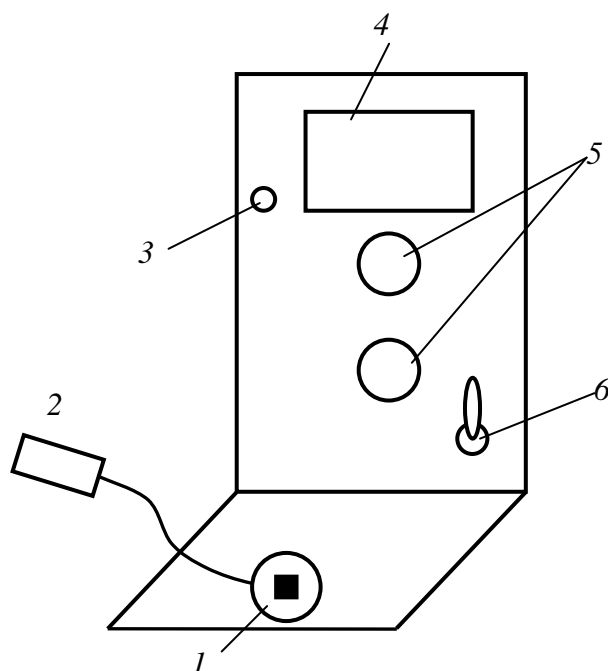


Рис. 7. Внешний вид блока №1: 1 – калориметрическая лампа; 2 – разъем для подключения нагревателя к конденсатору; 3 – установка нуля (редкая регулировка); 4 – показывающий прибор; 5 – установка нуля (грубо и точно); 6 – сетевой тумблер с индикаторной лампой

выставляют показывающий прибор 4 на нуль. Тумблером 6 «СЕТЬ» включают питание прибора.

Примечание: если ручками 5 нуль установить не удастся, выставить их в среднее положение и воспользоваться дополнительной регулировкой 3 с помощью отвертки.

2. Вставить сетевую вилку в розетку и включить тумблер «СЕТЬ», при этом должна загореться индикаторная лампа.

3. Ручками «УСТАНОВКА НУЛЯ» добиться нулевого показания прибора 4.

Задание 3. Выполнить градуировку калориметра.

Градуировка калориметра заключается в нахождении связи между показаниями регистрирующего прибора и энергией конденсатора (см. (19), (20)).

Порядок выполнения задания.

1. Ознакомиться с блоком № 4 и его схемой, приведенной на блоке и на рис.8. Он содержит конденсатор емкости $C = 22$ мкФ, гнезда “U” для подключения источника напряжения, разъемы «ВЫХОДЫ НА КАЛОРИМЕТР 1 и 2» для подключения к блоку нагревателя Н калориметра, зарядное сопротивление $R = 100$ Ом и переключатель на четыре положения. Для ознакомления с устройством типичного конденсатора он показан в разобранном виде.

2. На блоке питания выключить тумблер «ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».

3. Подключить: а) источник питания к гнездам “U” блока №4; б) провода от калориметра – к разъему «ВЫХОДЫ НА КАЛОРИМЕТР 2».

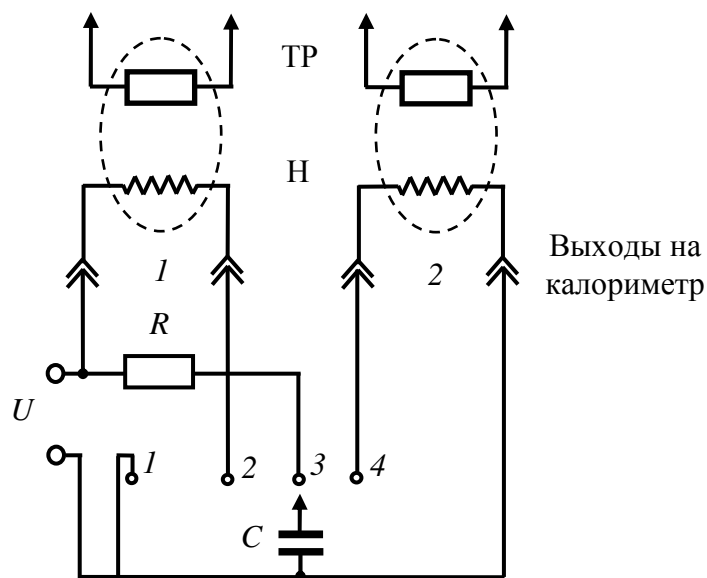


Рис. 8. . Схема блока №4: $C = 22 \text{ мкФ}$; $R = 100 \text{ Ом}$; Н – нагреватель калориметра; ТР – терморезистор; $U = 0 \dots 30 \text{ В}$ – напряжение источника.

4. Установить поворотный переключатель блока №4 в положение 3.
5. Установить напряжение источника в интервале $U = 25 \dots 30 \text{ В}$. Напряжение измерять двумя вольтметрами источников и суммировать их показания. Такое же напряжение будет на заряженном конденсаторе. Включить тумблер «ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ» блока питания.
6. Ручками «УСТАНОВКА НУЛЯ» добиться нулевого показания прибора калориметра.
7. Разрядить конденсатор через калориметр и заметить максимальное отклонение стрелки показывающего прибора в числе делений n . Для этого переключатель блока №4 перевести в положение 4. Значения U и n записать в табл. 2.

Примечание: если показывающий прибор калориметра «зашкаливает», уменьшить немного напряжение на конденсаторе.

Таблица 2

Градуировка калориметра

$U, \text{ В}$	$n, \text{ дел}$	$k, \text{ Дж/дел}$	$\langle k \rangle, \text{ Дж/дел}$

Примечание: таблица должна содержать 3 строки

8. Повторить измерение (п.п. 6, 7) два раза. Перед каждым новым измерением выждать примерно полминуты для охлаждения калориметра и установить нуль.
9. По результатам измерений вычислить по формуле (20) значение k , взяв емкость конденсатора в фарадах. Вычислить среднее $\langle k \rangle$. Результаты записать в табл. 2.

Задание 4. Изучить зависимость энергии конденсатора от напряжения.

Порядок выполнения задания.

1. Задание выполняют с блоком № 4. Последовательность действий такая же, как в задании 3. Напряжение на конденсаторе уменьшать от 30 В до 8 В с шагом 3...4 В. Результаты измерения U и n записать в табл. 3.

Таблица 3

Энергия конденсатора

U , В	n , дел	U^2 , В ²	W , Дж

Примечание. Таблица должна содержать примерно 7 строк.

2. По результатам измерений: а) вычислить U^2 ; б) вычислить W по формуле $W = \langle k \rangle n$. Результаты записать в табл. 3.

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

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

Задание 5. Измерить КПД емкостного накопителя энергии.

Конденсатор часто используют в качестве накопителя электрической энергии, например, в фотографической лампе – вспышке. В ней сначала заряжают конденсатор в течение нескольких секунд от источника тока малой мощности, а затем накопленная энергия выделяется за сотую долю секунды в газоразрядной лампе, которая дает кратковременное, мощное световое излучение.

При зарядке конденсатора ток проходит по цепи, имеющей сопротивление. В результате в проводах и в резисторе (если он имеется) выделяется теплота Джоуля-Ленца Q . Теплота Q – это потери энергии в работе накопителя. КПД процесса зарядки конденсатора равен

$$\eta = W / (W + Q), \quad (21)$$

где W – энергия конденсатора.

Вывод теоретической формулы для КПД. Пусть в конденсаторе емкости C накоплен заряд q при напряжении U . При этом энергия конденсатора $W = qU/2$ (см. (14)). Энергия конденсатора и теплота получены за счет работы *сторонних сил* источника, равной произведению заряда на ЭДС E источника

$$A_{\text{стор}} = qE = W + Q.$$

Тогда КПД

$$\eta = W / A_{\text{стор}} = (qU/2) / (qE) = U / (2E). \quad (22)$$

Как видно из вывода, КПД не зависит от сопротивления цепи (от него зависят сила зарядного тока и время зарядки). Наибольший КПД, равный $\eta = 0,5$, будет в случае полной зарядки конденсатора, до ЭДС источника: $U = E$.

Таким образом, в емкостном накопителе энергии половина (или больше) работы источника тока бесполезно теряется на теплоту.

Порядок выполнения задания.

1. Для нахождения КПД измеряют калориметром энергию конденсатора W и теплоту Q в цепи зарядки. Опыт выполняют с блоком №4 при напряжении источника примерно 25 В.

2. Измерить энергию конденсатора W , как это выполнялось в задании 4. Результаты измерения U и n записать в табл. 4. Вычислить W по формуле $W = \langle k \rangle n$.

КПД емкостного накопителя энергии

U , В	n , дел	W , Дж	n_1 , дел	Q , Дж	КПД η

3. До сих пор мы измеряли энергию конденсатора, разряжая его через нагреватель калориметра. Теперь поступим иначе – будем заряжать конденсатор, пропуская зарядный ток через нагреватель калориметра. В этом случае будет измерена теплота Q , выделившаяся в зарядной цепи.

4. Подключить калориметр к разъему «ВЫХОДЫ НА КАЛОРИМЕТР 1».

5. Разрядить конденсатор, установив переключатель в положение 1.

6. Повернуть переключатель в положение 2, при этом пойдет зарядный ток через нагреватель калориметра и стрелка отклонится на n_1 делений. Результат измерения n_1 записать в табл. 4.

7. Вычислить $Q = \langle k \rangle n_1$.

8. Вычислить КПД по формуле (21). Результат записать в табл. 4.

9. Сравнить полученный результат с теоретическим значением (22). Сделать выводы.

Задание 6. Изучить изменение электрической энергии заряженных и отключенных от источника тока конденсаторов при изменении емкости системы.

Теория. Рассмотрим случай, когда конденсатор емкости C_1 имеет заряд q и отключен от источника тока. Энергия конденсатора $W_1 = q^2 / (2C_1)$ (см. (14)). Будем изменять емкость конденсатора в заряженном состоянии. При этом заряд будет оставаться неизменным. При другой емкости, C_2 , энергия конденсатора $W_2 = q^2 / (2C_2)$. Отношение энергий

$$W_2 / W_1 = C_1 / C_2. \quad (23)$$

Из (23) видно, что при уменьшении емкости энергия конденсатора возрастает, а при увеличении емкости – энергия уменьшается.

Рассмотрите механизм изменения электрической энергии (рис. 9). В случае плоского воздушного конденсатора, расстояние между пластинами которого будем изменять (рис. 9, а), объяснить

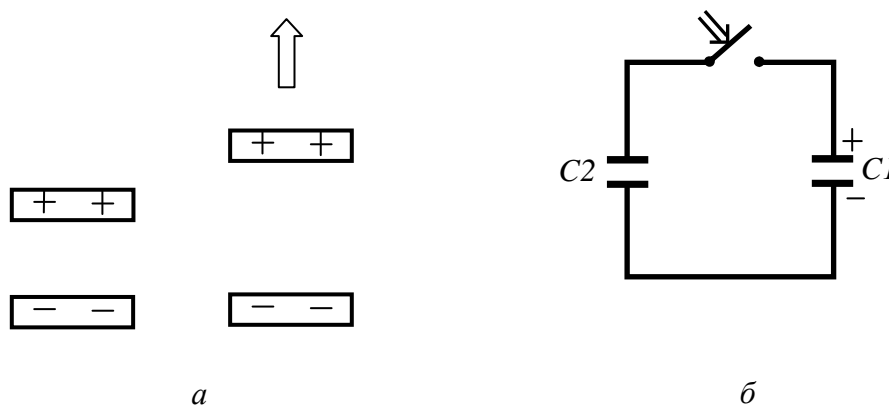


Рис. 9

- за счет какой энергии возрастает энергия конденсатора при уменьшении емкости, т.е. при увеличении расстояния между обкладками?

- в какой вид энергии переходит электрическая энергия при возрастании емкости конденсатора, т.е. при сближении обкладок?

Обсудим другой вариант изменения емкости, который выполняют в данной работе (рис. 9, б): к заряженному конденсатору емкости C_1 подключают незаряженный конденсатор емкости C_2 . В этом случае часть заряда перейдет на второй конденсатор. При этом суммарный заряд q сохранится и будет находиться в двух конденсаторах суммарной емкости $C = C_1 + C_2$. Полная энергия двух конденсаторов $W_2 = q^2 / (2 (C_1 + C_2))$. И в этом случае, как и в (23), отношение энергий обратно отношению емкостей

$$W_2 / W_1 = C_1 / (C_1 + C_2). \quad (24)$$

Из (24) видно, что электрическая энергия системы уменьшилась. Объяснить, в какую форму энергии и как перешла энергия электрического поля при соединении конденсаторов?

Порядок выполнения задания. Задание выполняют с блоком № 5.

1. Ознакомиться с электрической схемой (рис. 10). Схема содержит: два конденсатора одинаковой емкости $C_1 = C_2 = 22$ мкФ; гнезда «U» для подключения источника пита-

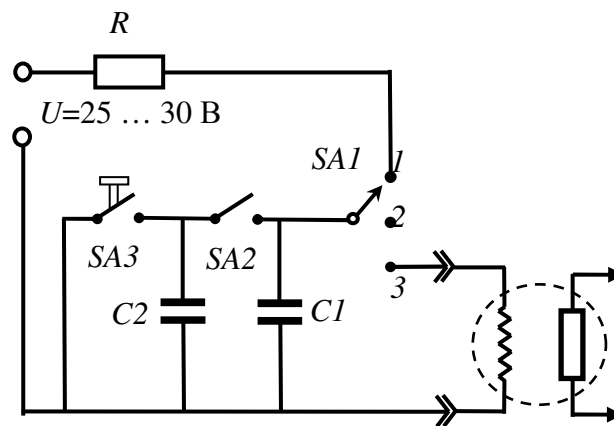


Рис. 10. Схема блока №5: оба конденсатора имеют емкость 22 мкФ

ния; разъем «ВЫХОД НА КАЛОРИМЕТР» для подключения схемы к нагревателю калориметра; тумблер SA1 на три положения; тумблер SA2 на два положения и кнопочный выключатель SA3, который замкнут в утопленном положении.

2. Опыт будет выполняться в следующей последовательности. Сначала заряжают конденсатор C_1 и измеряют его энергию. Затем его снова заряжают, подключают к нему незаряженный другой конденсатор и измеряют суммарную энергию двух конденсаторов.

3. Тумблер SA2 отключить. Установить переключатель SA1 в положение 1 для зарядки конденсатора C_1 . Подать на схему напряжение около 25 В и зарядить конденсатор.

4. Установить переключатель SA1 в положение 3, при этом конденсатор C_1 разрядится через калориметр, а стрелка показывающего прибора отклонится на n_1 делений. Результат измерения n_1 записать в табл. 5.

Таблица 5

n_1 , дел	n_2 , дел	$W_2/W_1 = n_2 / n_1$

5. Снова зарядить конденсатор C_1 , установив переключатель SA1 в положение 1. Отключить его от источника питания, переведя переключатель SA1 в положение 2. Нажать на секунду кнопку SA3 и разрядить конденсатор C_2 , который может оказаться в заряжен-

ном состоянии. Включить тумблер SA2 и присоединить незаряженный конденсатор к заряженному.

6. Переключить SA1 перевести в положение 3 и измерить суммарную энергию двух конденсаторов. Отклонение стрелки прибора (n_2) записать в табл. 5.

7. Вычислить отношение W_2 / W_1 , равное отношению n_2 / n_1 . Результаты записать в табл. 5.

8. Сравнить полученный результат с расчетом по формуле (24). Сделать выводы.

Задание 7. Измерить емкость конденсатора.

Известно много методов измерения емкости. Ясно, что емкость можно измерить с помощью калориметра.

Опыт выполняют с блоком № 6, который содержит конденсатор неизвестной емкости, переключатель «ЗАРЯДКА-РАЗРЯДКА», гнезда “U” для напряжения (примерно 30 В) и разъем для калориметра. Результаты измерения записать в табл. 6.

Таблица 6

Измерение емкости конденсатора

$U, В$	$n, дел$	$W, Дж$	$C, Ф$

ВНИМАНИЕ! Выключить сетевое питание всей установки.

Контрольные вопросы

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

Список рекомендуемой литературы

1. Калашиников 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.
4. Фетисов И.Н. Измерение энергии стационарных электрического и магнитного полей с помощью калориметра. Шестая международная конференция ”Физика в системе современного образования” (ФССО-01): Тез. доклада, том 2. Ярославль: Изд-во ЯГ-ПУ им. К.Д. Ушинского, 2001.