

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

И.Н.Фетисов

## Изучение закона Джоуля-Ленца

Методические указания к выполнению лабораторной работы Э -63  
по курсу общей физики

*Цель работы* – ознакомиться с законами Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и локальной формах [1-3]; проверить закон Джоуля-Ленца для постоянного и переменного токов калориметрическим методом измерений.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### 1. Электрический ток. Закон Ома

В металлах, а также в других проводниках, имеются заряженные микрочастицы, способные перемещаться по проводнику. Они движутся хаотически. С помощью электрического поля можно создать дополнительное, упорядоченное движение зарядов, называемое *электрическим током*.

*Сила тока* равна заряду, переносимому сквозь сечение проводника за единицу времени:

$$I = dq / dt, \quad (1)$$

где  $dq$  – заряд, переносимый за малый интервал времени  $dt$ .

Единицей силы тока является *ампер*:  $A = Кл/с$ . За положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов. Электроны в металле движутся в направлении, противоположном направлению тока.

Для детальной характеристики тока вводят вектор *плотности тока*  $\mathbf{j}$ . Модуль этого вектора численно равен отношению силы тока  $dI$  через элементарную площадку, расположенную в данной точке перпендикулярно направлению движения носителей, к ее площади  $dS$ :

$$j = dI / dS. \quad (2)$$

За направление вектора  $\mathbf{j}$  принимают направление вектора скорости  $\mathbf{u}$  упорядоченного движения положительных носителей.

Если концентрация носителей тока равна  $n$  (числу частиц в единице объема), а их заряд  $e$  (для электрона – отрицательный элементарный заряд), то

$$\mathbf{j} = en \mathbf{u}.$$

Сила тока, протекающего по однородному (без источников тока) проводнику, пропорциональна напряжению  $U$  на концах проводника (*закон Ома* для участка цепи, открытый экспериментально)

$$I = U / R, \quad (3)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление проводника ( $Ом = В/А$ ). Закон Ома является также определением физической величины – *сопротивления*  $R$ .

В случае однородного цилиндрического проводника сопротивление

$$R = \rho l / S,$$

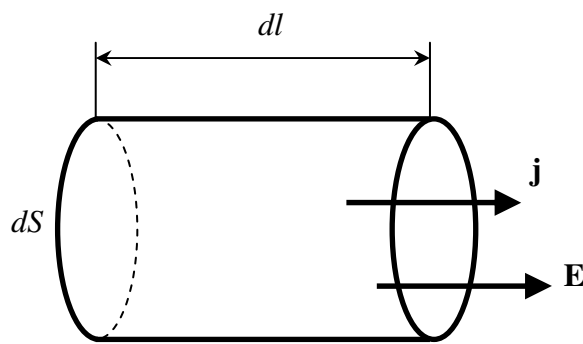
где  $l$  – длина проводника;  $S$  – площадь его поперечного сечения;  $\rho$  – *удельное электрическое сопротивление* (Ом · м), которое зависит от материала и температуры.

Электрический ток протекает не только по проводам, есть токи и в более сложных проводящих средах, например, в электролитической ванне, почве или в теле животного. В этих случаях ток характеризуют плотностью тока (2), а вместо закона Ома в форме (3) используют связь между плотностью тока  $\mathbf{j}$  и напряженностью поля  $\mathbf{E}$  в одной и той же точке проводящей среды.

**Напряженностью  $\mathbf{E}$**  электрического поля в данной точке называют отношение силы  $\mathbf{F}$ , действующей на точечный положительный заряд, к величине заряда

$$\mathbf{E} = \mathbf{F} / q.$$

Напряженность измеряют в Н/Кл или В/м.



**Рис. 1.** К выводу закона Ома в локальной форме

В изотропной проводящей среде упорядоченное движение положительных носителей тока происходит в направлении вектора  $\mathbf{E}$ . Поэтому направления векторов  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{E}$  совпадают. Выделим мысленно в окрестности некоторой точки элементарный цилиндрический объем с образующими, параллельными векторам  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{E}$  (рис.1). Через поперечное сечение цилиндра протекает ток  $j ds$ . Напряжение, приложенное к цилиндру, равно  $E dl$ , где  $E$  – напряженность поля (В/м) в данном месте. Сопротивление цилиндра равно  $\rho (dl / dS)$ . Подставляя эти значения в формулу (3), получим соотношение

$$j = E / \rho = \sigma E, \quad (4)$$

где  $\sigma = 1 / \rho$  – *удельная электропроводность среды*.

Воспользовавшись тем, что векторы  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{E}$  имеют одинаковое направление, можно записать

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}. \quad (5)$$

Эта формула выражает **закон Ома в локальной (дифференциальной) форме**: плотность тока пропорциональна напряженности поля и удельной электропроводности в данной точке.

## 2. Закон Джоуля – Ленца

Если электрический заряд  $dq$  переместился из одной точки электрического поля в другую с разностью потенциалов (напряжением)  $U$ , то поле совершило работу

$$dA = dq U.$$

Эта формула служит определением физической величины – **напряжения**  $U$ , единица измерения - *вольт*,  $V = \text{Дж/Кл}$ .

Работа тока может увеличить внутреннюю энергию проводника (нагревание, выделение теплоты), перейти в механическую работу (электрические двигатели) или произвести химическое превращение, например получение водорода.

Если проводники с током не перемещаются, а химических реакций нет, то вся работа тока переходит в теплоту

$$dQ = dq U. \quad (6)$$

При силе тока  $I$  за время  $dt$  проходит заряд  $dq = I dt$ , тогда

$$dQ = UI dt.$$

Теплота, выделяемая за единицу времени (**тепловая мощность**), равна

$$dQ/dt = UI. \quad (7)$$

Если на участке цепи выполняется закон Ома  $U = IR$ , тогда

$$dQ/dt = R I^2. \quad (8)$$

Эта формула выражает **закон Джоуля-Ленца**: тепловая мощность тока пропорциональна квадрату силы тока и сопротивлению.

Получим выражение для закона Джоуля-Ленца в локальной форме, подобно тому, как выводилась формула (4). Найдем тепловую мощность, выделяющуюся в малом элементе проводящей среды (рис. 1). Применяя формулу (8) для этого элемента, получим выражение для тепловой мощности в элементе объемом  $dV = dl dS$

$$dQ/dt = \rho (dl/dS) (j ds)^2 = \rho j^2 dV.$$

Мощность в единице объема ( $\text{Вт/м}^3$ ) – **удельная тепловая мощность**, равна

$$dQ/(dt dV) = \rho j^2.$$

Учитывая закон Ома (4, 5), получим

$$dQ/(dt dV) = \rho j^2 = \sigma E^2. \quad (9)$$

Эта формула выражает **закон Джоуля-Ленца в локальной форме**: удельная тепловая мощность электрического тока пропорциональна квадрату плотности тока и удельному сопротивлению среды в данной точке, или пропорциональна квадрату напряженности поля и удельной электропроводности.

Наглядная картина выделения теплоты при протекании тока в металле следующая. На электроны проводимости в электрическом поле действует сила, которая сообщает электронам ускорение, скорость их упорядоченного движения увеличивается, а также увеличивается их кинетическая энергия. Электроны, сталкиваясь с ионами кристаллической решетки металла, «теряют» направленное движение (с чем связано возникновение сопротивления электрическому току), а их добавочная кинетическая энергия передается кристаллической решетке, увеличивая ее внутреннюю энергию.

Выражения (8), (9) справедливы как для постоянного, так и переменного тока, изменяющегося по любому закону. Часто ток изменяется по гармоническому закону (рис. 2, а)

$$I = I_m \cos \omega t,$$

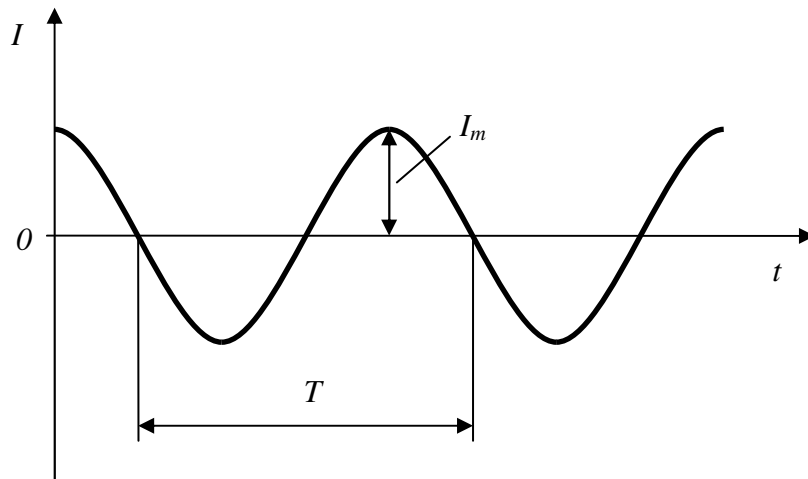
где  $I_m$  – амплитуда,  $\omega$  – циклическая частота ( $\omega = 2\pi/T$ ). Для такого тока закон Джоуля-Ленца (8) имеет выражение

$$dQ/dt = R I_m^2 \cos^2 \omega t.$$

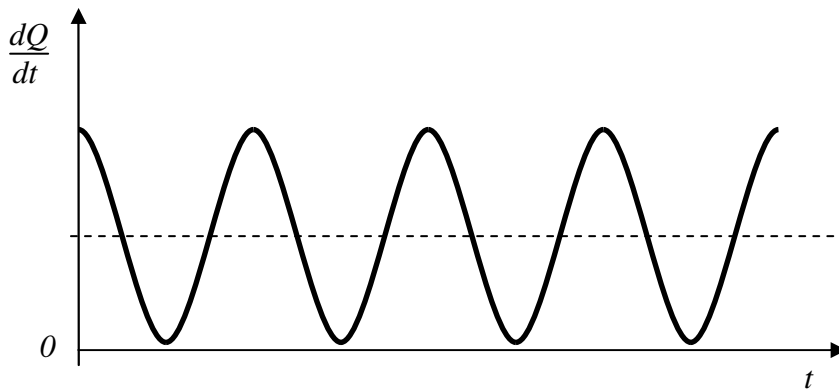
Мгновенная тепловая мощность изменяется по закону  $\cos^2 \omega t$  (рис. 2, б). Это изменение негармоническое, но периодическое, причем период в два раза меньше, чем для тока.

Часто интересуются *средней тепловой мощностью*, она равна

$$(dQ/dt)_{\text{ср}} = R I_m^2 / 2.$$



а



б

**Рис. 2.** Переменный ток, изменяющийся по гармоническому закону:

а – зависимость силы тока  $I$  от времени  $t$ ;  $I_m$  – амплитуда тока,  $T$  – период колебаний;

б – зависимость мгновенной тепловой мощности от времени; средняя мощность показана штрихами.

Средняя мощность в два раза меньше максимального значения  $R I_m^2$ , поскольку среднее за период значение квадрата косинуса равно  $1/2$ .

Такую же мощность развивает постоянный ток, сила которого равна

$$I_d = I_m / \sqrt{2} \quad (10)$$

Величина  $I_d$  называется *действующим*, или *эффективным* значением силы переменного, гармонического тока. Аналогично величина

$$U_d = U_m / \sqrt{2}$$

называется действующим, или эффективным значением напряжения.

Среднее тепловая мощность переменного тока равна

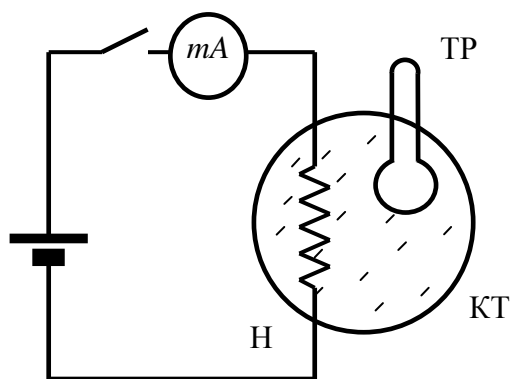
$$(dQ/dt)_{cp} = R I_d^2. \quad (11)$$

Такую же тепловую мощность имеет постоянный ток, равный действующему значению переменного тока.

### 3. Методика изучения закона Джоуля – Ленца

Закон Джоуля-Ленца проверяют с помощью калориметра. Калориметр – прибор для измерения количества теплоты, выделяющейся или поглощающейся в каком-либо физическом, химическом или биологическом процессе. Название «калориметр» происходит от единицы измерения теплоты - «калория». Конструкции калориметров разнообразны и определяются характером изучаемых процессов.

Схема, поясняющая методику опыта, показана на рис. 3. Калориметр содержит три основных элемента: нагреватель (резистор) Н, в котором при протекании тока выделяется



**Рис. 3.** К пояснению методики опыта:

КТ – калориметрическое тело; Н – электрический нагреватель (резистор сопротивлением 100 Ом); ТР – термометр; mA – миллиамперметр.

теплота Джоуля-Ленца; нагреваемое калориметрическое тело КТ; термометр ТР для измерения приращения температуры тела.

Перед измерением ток в нагревателе отсутствует, а калориметрическое тело имеет температуру  $T_0$  окружающих предметов. После включения тока калориметрическое тело нагревается, появляется разность температур между ним и окружающими телами, поэтому возникает поток тепла наружу. Теперь часть выделяющейся теплоты идет на повышение температуры калориметрического тела, а другая часть передается окружающим телам. При увели-

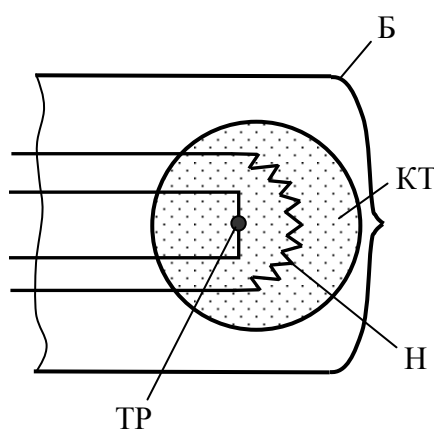
чении температуры теплоотдача увеличивается и, наконец, при температуре  $T$  наступает тепловое равновесие: вся выделяющаяся теплота отдается наружу, а возрастание температуры прекратилось. Температура калориметра выросла на величину  $\Delta T = T - T_0$  по сравнению с исходной температурой. При тепловом равновесии величина  $\Delta T$  (если она небольшая) пропорциональна тепловой мощности нагревателя

$$\Delta T = \alpha (dQ/dt), \quad (12)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от условий теплопередачи от нагретого тела к окружающей среде.

Измеряя величину  $\Delta T$  при различной силе тока, можно проверить закон Джоуля-Ленца.

В калориметре, разработанном на кафедре физики МГТУ им. Баумана [4], используется специальная лампа (рис. 4), которую будем называть *калориметрической лампой*, или *ка-*



**Рис. 4.** Калориметрическая лампа: Б – стеклянный баллон; КТ – калориметрическое тело размером примерно 1 мм; Н – нагревательная спираль; ТР – терморезистор (термометр).

*лориметром.* В стеклянном баллоне Б с разреженным газом находится нагреваемое калориметрическое тело КТ, содержащее электрический нагреватель Н и электрический термометр – терморезистор ТР. Размер нагреваемого калориметрического тела всего примерно 1 мм, поэтому его теплоемкость и тепловая инерция очень малы.

Терморезистор представляет собой крошечную бусинку из полупроводника с двумя металлическими выводами. Сопротивление терморезистора сильно зависит от температуры – при возрастании температуры на  $1^\circ\text{C}$  сопротивление уменьшается на несколько процентов. Поэтому малые изменения температуры легко измерять терморезистором.

Сопротивление полупроводникового терморезистора нелинейно зависит от температуры. При выполнении опыта калориметрическое тело нагревается незначительно, поэтому приращение сопротивления терморезистора можно считать пропорциональным приращению температуры  $\Delta T$

$$\Delta R = \beta \Delta T, \quad (13)$$

где  $\beta$  – коэффициент пропорциональности.

С помощью специальной электрической схемы небольшое изменение сопротивления преобразуют в напряжение, пропорциональное изменению сопротивления

$$U_k = \gamma \Delta R. \quad (14)$$

Объединяя формулы (12) – (14), получим

$$dQ/dt = \kappa U_{\kappa}, \quad (15)$$

где коэффициент пропорциональности  $\kappa = 1/(\alpha\beta\gamma)$  имеет размерность - ампер.

Таким образом, измеряемое в опыте напряжение  $U_{\kappa}$  пропорционально тепловой мощности. Поэтому величину  $U_{\kappa}$  можно рассматривать как **тепловую мощность в условных единицах**. Согласно закону Джоуля-Ленца (8), величина  $U_{\kappa}$  должна быть пропорциональной квадрату силы тока через нагреватель калориметра.

Экспериментально можно найти коэффициент  $\kappa$ , это действие называют *градуировка калориметра*. Тогда по формуле (15) можно вычислить тепловую мощность в **абсолютных единицах** – ваттах.

Градуировка состоит в следующем опыте. Через нагреватель калориметра пропускают ток  $I$ , измеряют  $U_{\kappa}$  и находят значение  $\kappa$  из формулы

$$dQ/dt = \kappa U_{\kappa} = RI^2$$

или

$$\kappa = RI^2/U_{\kappa}, \quad (16)$$

где  $R = 100$  Ом – сопротивление нагревателя калориметра.

Для проверки закона Джоуля-Ленца (8) измеряют  $U_{\kappa}$  при различной силе тока  $I$  нагревателя, вычисляют по формуле (15) тепловую мощность и строят зависимость  $dQ/dt$  от  $I^2$ . Эта зависимость должна быть линейной.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Электрические схемы установки

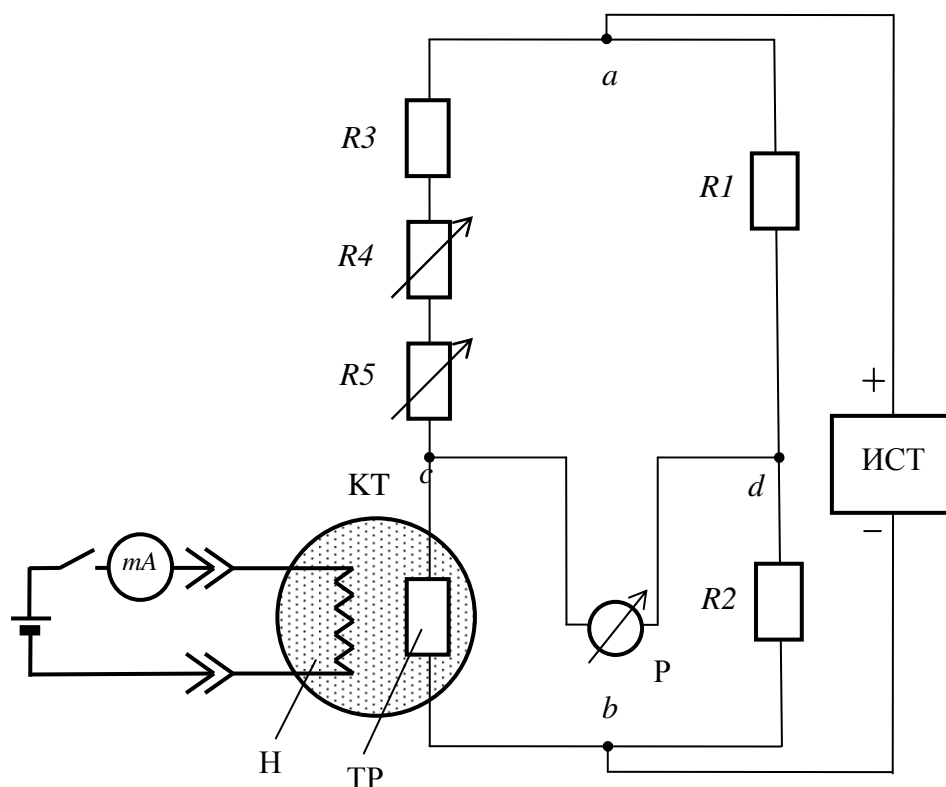
Электрическая схема калориметра показана на рис. 5. Внутри крошечного калориметрического тела КТ находятся нагреватель Н из нихромовой проволоки сопротивлением 100 Ом и терморезистор (термометр) ТР сопротивлением 33 кОм.

Терморезистор включен в схему, содержащую четыре плеча из резисторов, источник питания «ИСТ» и показывающий цифровой вольтметр Р. Эта схема преобразует небольшое изменение сопротивления ТР при нагревании калориметра в выходное напряжение  $U_{\kappa}$ , пропорциональное тепловой мощности и измеряемое прибором Р.

Схема работает следующим образом. Если ток не проходит через калориметр, в калориметре теплота не выделяется. В этом случае прибор Р должен показывать «нуль». Этого добиваются вращением ручек «УСТАНОВКА НУЛЯ» (грубо и точно), которыми изменяют сопротивление переменных резисторов  $R4$  и  $R5$  настолько, чтобы потенциалы точек  $c$  и  $d$  стали одинаковыми (рис. 5).

Затем через нагреватель Н пропускают ток, температура калориметра повышается на  $\Delta T$ , а сопротивление ТР уменьшается на  $\Delta R$ . 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  $U_{\kappa}$ , которое записывают. При небольших  $\Delta T$  напряжение  $U_{\kappa}$  пропорционально тепловой мощности.

На рис. 6 показана упрощенная схема питания нагревателя калориметра. Она имеет источники постоянного тока ИСТ-1 и переменного тока ИСТ-2. Миллиамперметром «mA» на 3 мА измеряют силу постоянного тока. Переключатель (тумблер) П имеет три положения: 1 – постоянный ток, 2 – переменный ток и среднее положение (ноль 0) - ток выключен. Переменным резистором  $R1$  изменяют силу тока. Напряжение на резисторе  $R2$ , пропорциональное силе тока, подается на осциллограф для измерения постоянного тока и амплитуды перемен-



**Рис. 5.** Электрическая схема калориметра: КТ – калориметрическое тело лампы; Н – нагреватель; ТР – терморезистор; Р – регистрирующий прибор; ИСТ – источник постоянного напряжения 9 В.

ного тока. Через два разъема схему подключают к нагревателю калориметра и к осциллографу.

## 2. Выполнение работы

### Задание 1. Ознакомление с установкой

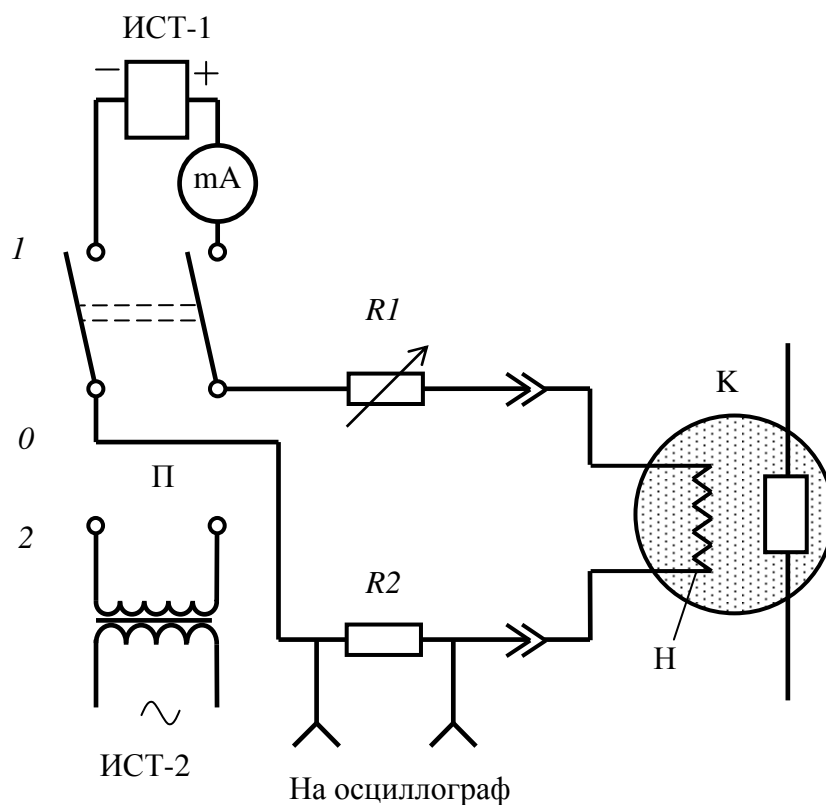
Установка показана на рис.7. Калориметрическая лампа 1 находится в камере с прозрачной крышкой. Ручками 2 производится регулировка «УСТАНОВКА НУЛЯ». Цифровой вольтметр 4 показывает выходной сигнал  $U_k$  калориметра, называемый «ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ В УСЛОВНЫХ ЕДИНИЦАХ». Кнопочным выключателем 3 подводится батарейное питание к измерительному прибору.

Тумблером 6 на три положения «ПОСТ. ТОК / ВЫКЛ / ПЕРЕМ. ТОК» выбирают режим измерения. Миллиамперметром 9 измеряют силу постоянного тока; работают с нижней шкалой 0...30, делению «30» соответствует ток 3 мА. Для изменения тока используется ручка 5 «РЕГУЛИРОВКА ТОКА».

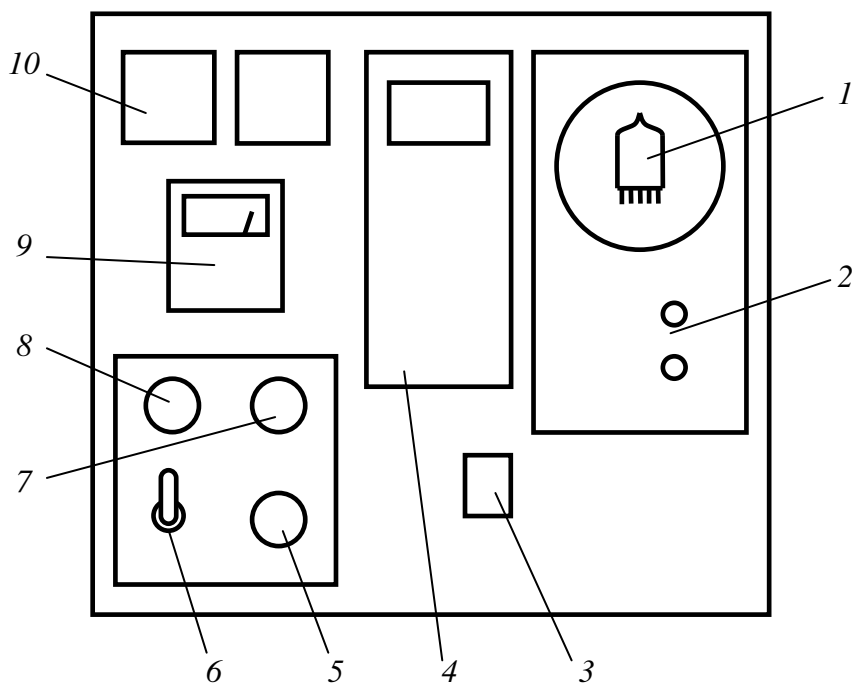
К разъему 7 «ВЫХОД НА КАЛОРИМЕТР» подключена нагревательная спираль калориметрической лампы. К разъему 8 «ВЫХОД НА ОСЦИЛЛОГРАФ» подключают вход осциллографа для сравнительного измерения амплитуды переменного тока  $I_m$  и силы постоянного тока  $I$ .

Источники питания 10 используются для работы измерительной схемы и создания тока через нагреватель калориметра.





**Рис. 6.** Схема питания нагревателя калориметра: ИСТ-1, ИСТ-2 – источники постоянного и переменного тока; П – переключатель токов; К – калориметр; Н – нагреватель;  $R1$  – регулировка тока;  $R2$  – сопротивление, с которого подается напряжение на осциллограф, пропорциональное силе тока.



**Рис. 7.** Внешний вид установки: 1 – калориметрическая лампа; 2 – «УСТАНОВКА НУЛЯ» (грубо и точно); 3 – кнопка включения питания цифрового прибора; 4 – показывающий прибор калориметра; 5 – «РЕГУЛИРОВКА ТОКА»; 6 – тумблер «ПОСТ. ТОК / ВЫКЛ / ПЕРЕМ. ТОК»; 7 – «ВЫХОД НА КАЛОРИМЕТР»; 8 – «ВЫХОД НА ОСЦИЛЛОГРАФ»; 9 – миллиамперметр; 10 – источники питания.

*Порядок выполнения задания.*

1. Зарисовать принципиальную схему опыта (рис. 3).
2. Тумблер «ПОСТ. ТОК / ВЫКЛ / ПЕРЕМ. ТОК» поставить в среднее положение «ВЫКЛ».
3. Включить установку, для этого вставить вилку в сетевую розетку. При этом должны загореться индикаторы источников питания.
4. Ознакомиться с цифровым прибором. Он двухканальный; используется канал «СН1» в режиме измерения постоянного напряжения «=V»; другой канал (верхний переключатель) - выключен. Органы управления цифрового прибора установлены в необходимый режим измерения, они не нуждаются в регулировке и закрыты стеклом.
5. Нажать и удерживать кнопку 3 для включения батарейного питания прибора. Через несколько секунд после нажатия кнопки прибор приходит в рабочее состояние. Информация на индикаторе показана для примера на рис. 8.



**Рис. 8.** Пример информации на индикаторе цифрового прибора в режиме измерения постоянного тока в вольтах (V):

*CH1* – название канала; *AUTO* – автоматическая установка десятичной точки; *V* – результат измерения в вольтах; «---» - отрицательная поляр-

6. Ручками 2 «УСТАНОВКА НУЛЯ» добиться нулевого значения на шкале цифрового прибора. Если напряжение близко к нулю, то при вращении ручек может изменяться полярность напряжения; при отрицательной полярности на индикаторе появляется знак «---» под словом «*AUTO*».

7. После установки нуля прибор готов к измерениям тепловой мощности. В ходе выполнения лабораторной работы необходимо проверить нуль несколько раз и подстроить его.

**Внимание!** «Нуль» калориметра чувствителен к небольшим изменениям температуры в помещении. Поэтому установка должна располагаться в месте, где температура наиболее постоянная.

**Задание 2.** Градуировка калориметра.

Градуировка заключается в нахождении связи между измеряемым сигнальным напряжением  $U_k$ , названным «тепловая мощность в условных единицах» и тепловой мощностью  $dQ/dt$  в джоулях (абсолютных единицах).

*Порядок выполнения задания.*

1. Подготовить табл. 1 для записи результатов измерений.

*Таблица 1*

**Градуировка калориметра**

$I, \text{mA}$	$U_k, \text{V}$	$k$	<k>

*Примечание.* В таблице должно быть 3 строки

2. Тумблер «ПОСТ. ТОК / ВЫКЛ / ПЕРЕМ. ТОК» установить в положение «ВЫКЛ».
3. Проверить «нуль» прибора, при необходимости – установить его.

4. Тумблером «ПОСТ. ТОК / ВЫКЛ / ПЕРЕМ. ТОК» включить постоянный ток и ручкой «РЕГУЛИРОВКА ТОКА» установить ток 2.5...3 мА. Ток измерять миллиамперметром по нижней шкале. Вся шкала соответствует току 3 мА.

5. Тепловое равновесие калориметра наступает не раньше, чем через полторы минуты после включения или изменения тока через нагреватель калориметра. Поэтому измерение напряжения  $U_k$  цифрового прибора можно производить после выдержки 1.5...2 мин. Результаты измерения тока в мА и напряжения в вольтах записать в табл. 1.

6. Прделанное измерение повторить два раза. При этом ток надо выключить, через 1 мин включить, дождаться равновесия и измерить напряжение  $U_k$ .

7. По результатам измерений вычислить по формуле (16) коэффициент  $\kappa$ , выразив ток в амперах. Результаты вычисления коэффициента записать в табл. 1.

8. Вычислить среднее  $\langle \kappa \rangle$  и записать его в табл. 1.

**Задание 3.** Изучить зависимость тепловой мощности от силы постоянного тока.

*Порядок выполнения задания.*

1. Подготовить табл. 2 для записи результатов измерений.

Таблица 2

### Закон Джоуля – Ленца для постоянного тока

$I$ , мА	$U_k$ , В	$I^2$ , мА <sup>2</sup>	$dQ/dt = \langle \kappa \rangle U_k$ , Вт

*Примечание.* В таблице должно быть до 7 строк

2. Тумблер «ПОСТ. ТОК / ВЫКЛ / ПЕРЕМ. ТОК» установить в положение «ВЫКЛ».

3. Проверить «нуль» прибора; при необходимости – установить его.

4. Ручку «РЕГУЛИРОВКА ТОКА» повернуть против часовой стрелки до упора (минимальный ток).

5. Включить постоянный ток, установить ток примерно 1 мА. Ток измерять миллиамперметром по нижней шкале. Вся шкала соответствует току 3 мА.

6. Через 1.5... 2 мин измерить напряжение  $U_k$  цифрового прибора. Результаты измерения тока и напряжения записать в табл. 2.

7. Увеличить ток примерно в 1.2 раза, подождать 1.5...2 мин, записать результаты измерения  $I$  и  $U_k$  в табл. 2.

8. Повторить измерения п. 7, увеличивая каждый раз ток примерно в 1.2 раза до максимального значения 3 мА. Результаты измерения записать в табл. 2.

9. По результатам измерений вычислить  $I^2$ ,  $dQ/dt$  по формуле (15), используя среднее значение коэффициента  $\langle \kappa \rangle$ , полученное в задании 2. Результаты записать в табл. 2.

10. По результатам измерений построить на миллиметровой бумаге зависимость  $dQ/dt$  от  $I^2$  (в мА<sup>2</sup>).

Для этого по осям координат создать шкалы, удобные для построения и пользования графика. Затем на график нанести результаты измерений крупными точками. Через экспериментальные точки и начало координат провести наилучшую «на глаз» прямую.

11. Сделать вывод, согласуются ли результаты измерений с законом Джоуля-Ленца?

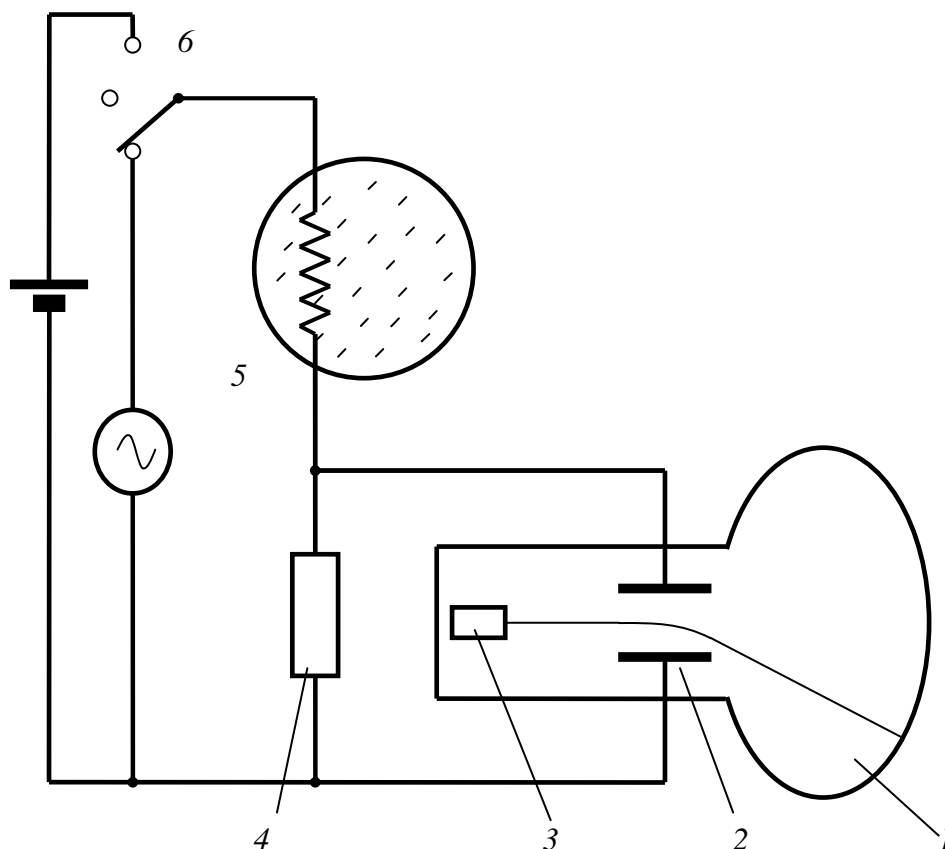
**Задание 4.** Изучение закона Джоуля-Ленца для переменного тока.

При прохождении через нагреватель калориметра переменного тока с частотой 50 Гц (обычная электрическая сеть) быстрые изменения тепловой мощности усредняются калориметром вследствие его тепловой инерции. В этом случае калориметр измеряет среднюю тепловую мощность тока.

Содержание задания следующее. Через калориметр пропускают переменный ток с амплитудой  $I_m$  и измеряет среднюю тепловую мощность (напряжение  $U_k$ ). Затем пропускают постоянный ток, сила которого в корень из двух раз меньше амплитудного значения переменного тока  $I = I_m / \sqrt{2}$ , т.е. равна действующему значению (10) переменного тока. Для

постоянного тока измеряют тепловую мощность и сравнивают результаты измерений  $U_k$  для двух случаев. Они должны быть одинаковыми.

В этом опыте амплитуду  $I_m$  переменного тока и силу постоянного тока  $I$  измеряют осциллографом. На рис. 9 представлена упрощенная схема опыта, поясняющая способ измерения токов. Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) 1 осциллографа содержит электронную «пушку» 3, которая создает узкий луч быстрых электронов. Падая на люминесцентный экран



**Рис. 9.** Схема измерения тока осциллографом:

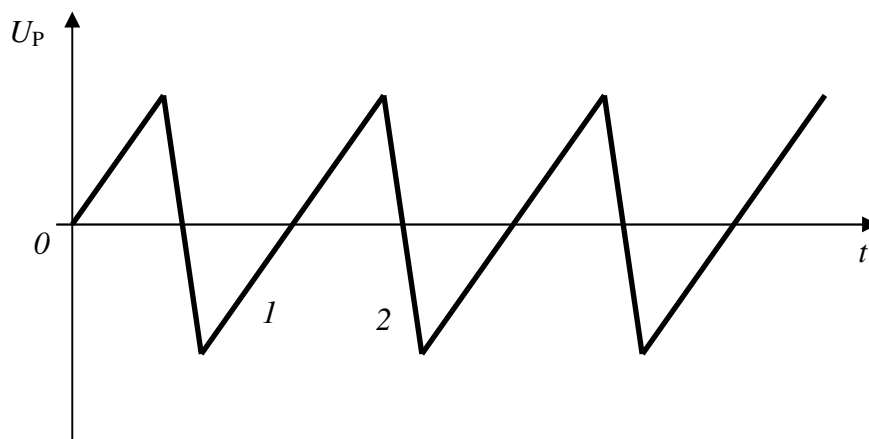
1 – электронно-лучевая трубка; 2 – пластины вертикального отклонения; 3 – электронная пушка; 4 – резистор; 5 – нагреватель калориметра; 6 – переключатель «постоянный ток / выключено/ переменный ток».

трубки, электроны вызывают его свечение в виде точки.

ЭЛТ содержит две пары пластин для отклонения луча в двух поперечных направлениях. Если на пару пластин подать напряжение, то между ними возникает электрическое поле, отклоняющее электроны. Пластины 2 называются пластинами вертикального отклонения. На эти пластины подают напряжение с резистора 4, которое пропорционально току, проходящему через резистор и нагреватель 5 калориметра. Смещение луча на экране пропорционально напряжению на пластинах, следовательно, и току через калориметр.

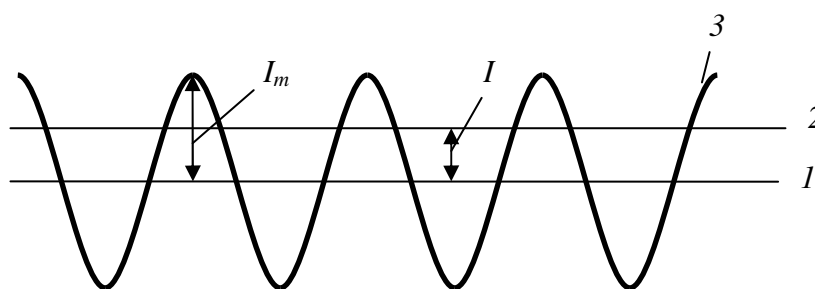
Переключателем 6 включают либо переменный, либо постоянный ток. С помощью осциллографа по отклонению луча сравнивают величину постоянного тока и амплитуду переменного тока.

Вторая пара пластин отклоняет луч по горизонтали. Специальный генератор осциллографа вырабатывает переменное напряжение, изменяющееся пилообразно (рис. 10). Оно называется напряжением развертки  $U_p$ . Это напряжение отклоняет луч по горизонтали. На участке 1 напряжение возрастает пропорционально времени, при этом светящаяся точка на экране движется равномерно (слева – направо), создавая на экране горизонтальную *ось време-*



**Рис.10.** пилообразное напряжение развертки: 1 – прямой (рабочий) ход луча; 2 – обратный ход луча.

ни. Масштаб времени можно изменять. На участке 2 пилообразного напряжения луч быстро возвращается на начало оси времени (это обратное движение луча не выводится на экран). Прямой и обратный ходы луча повторяются. Если это движение быстрое, мы видим на экра-



**Рис.11.** Рабочая осциллограмма: 1 – ось времени; 2 – постоянный ток; 3 – переменный ток

не не точку в движении, а сплошную линию.

Если ток через калориметр выключен, а развертка работает, на экране наблюдают горизонтальную ось времени (прямая 1 на рис. 11). В осциллографе имеется ручка, вращением которой ось смещают по вертикали. Этой регулировкой устанавливают ось в середине экрана.

Если через калориметр пропустить постоянный ток, на вертикальные пластины подается постоянное напряжение, которое смещает ось времени на величину, пропорциональную силе тока  $I$  (прямая 2 на рис. 11).

Если ток переменный, то при правильной настройке развертки, на экране видим «синусоиду» 3 – зависимость тока от времени. Максимальное отклонение луча от оси времени пропорционально амплитуде тока  $I_m$ .

**Порядок выполнения задания.**

1. Подготовить табл. 3 для записи результатов измерений.

Таблица 3

**Закон Джоуля – Ленца для переменного тока**

Постоянный ток		Переменный ток	
$I$ , дел	$U_{к1}$ , В	$I_m = \sqrt{2} I$ , дел	$U_{к2}$ , В
Отношение $U_{к1} / U_{к2} = \dots$			

2. Ознакомиться с инструкцией по работе с осциллографом, которая находится на рабочем месте или у лаборанта.

3. Включить осциллограф и установить рабочий режим, пользуясь инструкцией и помощью учебного мастера.

4. Тумблер «ПОСТ. ТОК / ВЫКЛ / ПЕРЕМ. ТОК» установить в положение «ВЫКЛ». Проверить «нуль» калориметра, при необходимости – установить его.

5. Ручкой смещение луча по вертикали установить линию развертки точно в среднее положение.

6. Включить постоянный ток и установить ток около 3 мА (по стрелочному миллиамперметру).

7. Измерить ток осциллографом. Для этого ручками осциллографа, которые изменяют усиление сигнала, добиться того, чтобы отклонение луча от средней линии составляло примерно 1/3 вертикальной шкалы. Эту регулировку далее не изменять.

Тщательно измерить отклонение луча в делениях шкалы. Результат измерения ( $I$ , дел) для постоянного тока записать в табл. 3.

8. Измерить напряжение  $U_{к1}$  цифрового прибора и записать результат в табл. 3.

9. Включить переменный ток тумблером «ПОСТ. ТОК / ВЫКЛ / ПЕРЕМ. ТОК». Регулировкой осциллографа добиться стабильной развертки. Ручкой «РЕГУЛИРОВКА ТОКА» установить ток, амплитуда которого  $I_m$  в делениях шкалы в  $\sqrt{2}$  раз больше постоянного тока.

10. Измерить напряжение  $U_{к2}$  цифрового прибора. Результаты измерения тока и напряжения записать в табл. 3.

11. Вычислить отношение  $U_{к1} / U_{к2}$ . Результат записать в табл. 3.

12. Сделать выводы.

**Внимание!** Выключить осциллограф тумблером, а калориметр - вилкой.

### Контрольные вопросы и задания

1. Что называют электрическим током? Что такое сила и плотность тока?
2. Объяснить закон Ома.
3. Что такое сопротивление проводника? Как рассчитать сопротивление провода?
4. Написать и объяснить закон Ома в дифференциальной (локальной) форме.
5. Что такое напряжение? Как оно связано с работой тока при перемещении заряда?
6. В какие виды энергии переходит работа тока? Приведите примеры.
7. Объяснить закон Джоуля-Ленца.
8. Написать и пояснить закон Джоуля-Ленца в локальной форме.
9. Что такое действующее значение силы синусоидального тока? Как оно связано с амплитудой?
10. Объяснить устройство калориметра и методику проверки закона Джоуля-Ленца для постоянного и переменного тока.

### Список рекомендуемой литературы

1. Калашиков 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 ЯГПУ им. К.Д. Ушинского, 2001.