

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра физики

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ОМА И ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА  
В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Методические указания к лабораторной работе по физике  
для студентов строительных специальностей

Минск  
БНТУ  
2011

УДК 537.31(075.6)  
ББК 22.33я7  
И 88

Составители:  
*В.С. Позняк, А.А. Баранов*

Рецензенты:  
*Л.Н. Смурага, В.А. Потачиц*

В методических указаниях рассмотрены характеристики электрического тока и условия его существования, а также законы Ома и Джоуля–Ленца. Дан вывод законов Ома и Джоуля–Ленца в дифференциальной форме по классической электронной теории металлов. Изложена методика экспериментального исследования дифференциальной формы этих законов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Электрический ток, его характеристики и условия существования.....	4
2. Закон Ома .....	8
3. Закон Джоуля–Ленца .....	11
4. Вывод законов Ома и Джоуля–Ленца в дифференциальной форме по классической электронной теории металлов .....	14
5. Методика исследования законов Ома и Джоуля–Ленца в дифференциальной форме .....	17
6. Подготовка установки к работе.....	18
7. Порядок выполнения работы .....	18
Вопросы к зачету .....	19
Литература .....	20

## ***Цель работы***

1. Ознакомиться с явлением электрического тока; выяснить основные характеристики и закономерности, а также условия существования электрического тока.
2. Экспериментально исследовать законы Ома и Джоуля–Ленца в дифференциальной форме.

***Приборы и принадлежности:*** проволочный проводник из исследуемого металла, установка для измерений, электроизмерительные приборы.

## **1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК, ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ**

В учении об электричестве, в котором рассматриваются явления и процессы, обусловленные движением электрических зарядов или макроскопических заряженных тел, важнейшим понятием является понятие электрического тока. Всякое *упорядоченное движение* заряженных частиц (или тел) называется *электрическим током*. За направление движения тока условно принимают направление движения положительных зарядов.

Различают несколько видов электрического тока. Предположим, что имеется макроскопическое заряженное тело (например, шар), которое перемещается в пространстве. Так как вместе с телом будут перемещаться заряды, то возникает направленное движение зарядов, т.е. электрический ток. Такой ток, связанный с движением заряженных макроскопических тел, называется *конвекционным* (переносным) током.

Если внутри какого-то тела упорядоченно перемещается огромное число заряженных частиц вследствие того, что в нем создается электрическое поле, то такой ток называется *током проводимости*. Для его получения требуется наличие замкнутой цепи и источника тока. По определению, вектор напряженности поля  $\mathbf{E}$  имеет направление от положительного заряда к отрицательному. Следовательно, находящиеся внутри проводника положительно заря-

женные частицы будут двигаться по полю, а отрицательные – против поля.

Если электрические заряды под влиянием внешнего поля движутся в вакууме, то такой ток называется **током в вакууме**. Например, ток в электронных вакуумных лампах, кинескопах и т.д.

Итак, для возникновения и существования электрического тока необходимо:

1) наличие в данной среде **носителей заряда**, т.е. заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно;

2) наличие в данной среде **электрического поля**, энергия которого, каким-то образом восполняясь, затрачивалась бы на упорядоченное перемещение электрических зарядов. Присутствие электрического поля всегда связано с наличием **разности потенциалов на концах проводника**.

Количественной характеристикой электрического тока служит **сила тока**  $I$ . Сила тока есть скалярная физическая величина, численно равная количеству электричества (заряду), переносимому через площадку  $S$  в единицу времени, т.е.

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

Если за любые равные промежутки времени через любое сечение проводника проходят одинаковые количества электричества и направление движения зарядов не изменяется, то такой ток называется **постоянным**. Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t}. \quad (2)$$

В международной системе единиц (СИ) единица силы тока является основной. Она носит название **ампер** и определяется из взаимодействия двух токов. Из равенства (2) следует определение единицы заряда:

$$[q] = [I] \cdot [t] = \text{А} \cdot \text{с} = \text{Кл}.$$

Силу тока можно выразить через среднюю скорость  $v$  упорядоченного движения зарядов в проводнике. При концентрации носителей тока  $n$  и заряде каждого носителя  $e$  за время  $dt$  через поперечное сечение  $S$  проводника переносится заряд

$$dq = nevSdt. \quad (3)$$

Тогда сила будет

$$I = \frac{dq}{dt} = nevS. \quad (4)$$

Заметим, что сила тока есть, по определению, скалярная величина; знак скалярного произведения  $\mathbf{vS} = vS \cos \alpha$  зависит от угла  $\alpha$  между направлением тока (т.е. направлением движения положительных зарядов) и направлением нормали к площадке. Вектор  $S = S\mathbf{n}$ , где  $\mathbf{n}$  – нормаль к площадке  $S$ .

Распределение электрического тока по сечению проводника характеризуется **плотностью тока**, которая выражается формулой

$$j = \frac{dI}{dS}. \quad (5)$$

В случае постоянного тока

$$j = \frac{I}{S} = \frac{q}{St}. \quad (6)$$

Учитывая выражение (4), получим

$$j = nev, \quad (7)$$

а в векторной форме

$$\mathbf{j} = nev. \quad (8)$$

Таким образом, плотность тока  $\mathbf{j}$  есть **векторная величина**, направленная по току, т.е. направление вектора  $\mathbf{j}$  совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов. В СИ плотность тока измеряется в  $A/m^2$ .

Сила тока сквозь произвольную поверхность  $S$  определяется как поток вектора  $\mathbf{j}$ , т.е.

$$I = \int_S j_n ds, \quad (9)$$

где  $j_n$  – проекция  $\mathbf{j}$  на нормаль  $\mathbf{n}$  к площадке  $ds$ .

Следует обратить еще внимание на отдельные особенности, характерные в основном для тока проводимости. Если на концах проводника длиной  $l$  имеется разность потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , кото-

рая создает внутри него электрическое поле  $E$ , направленное в сторону падения потенциала, то

$$E = -\frac{d\varphi}{dl} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l}. \quad (10)$$

При этом в проводнике возникает электрический ток, который идет от большего потенциала ( $\varphi_1$ ) к меньшему ( $\varphi_2$ ).

Движение зарядов от  $\varphi_1$  к  $\varphi_2$  приводит к выравниванию потенциалов во всех точках. Электрическое поле в проводнике при этом исчезает, и ток прекращается. Очевидно, обязательным условием существования тока является наличие разности потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \neq 0$ . Для этого необходимо устройство, которое разделяло бы заряды на концах проводника, т.е. заставляло бы положительные заряды двигаться на участке внутри этого устройства в сторону возрастания  $\varphi$ , а отрицательные – в сторону убывания  $\varphi$ , т.е. против сил электрического поля  $E$  (рис. 1). Перенос носителей на таком участке возможен только с помощью сил **неэлектростатического происхождения (сторонних сил)**. Подобные устройства называют **источниками тока**.

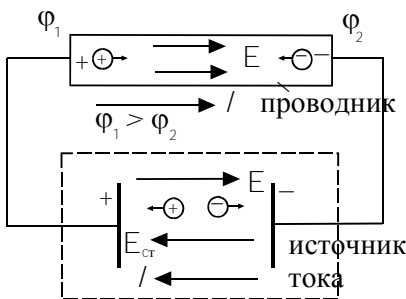


Рис. 1

Природа сторонних сил может быть различной. Например, в гальванических элементах они возникают за счет энергии химических реакций между электродами и электролитами; в генераторе – за счет механической энергии вращения ротора генератора и т.п. Под действием создаваемого поля сторонних сил  $E_{ст}$  электрические заряды дви-

жутся внутри источника тока против сил электростатического поля (рис. 1), благодаря чему на концах проводника поддерживается разность потенциалов и в цепи течет постоянный электрический ток.

Помимо разделения электрических зарядов на концах проводника, источник тока выполняет одновременно и вторую задачу – он замыкает электрическую цепь, по которой можно было бы осу-

существлять непрерывное движение зарядов. Ток течет во внешней части – проводнику и во внутренней – источнику тока (рис. 1). Источник тока имеет два полюса: положительный с более высоким потенциалом и отрицательный с более низким потенциалом. При разомкнутой внешней цепи на отрицательном полюсе (или выводе) источника тока образуется избыток электронов, а на положительном – недостаток.

Если цепь, состоящая из проводника и источника тока, замкнута, то по ней проходит ток и при этом совершается работа сторонних сил.

Величину, численно равную работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль цепи, называют *электродвижущей силой*  $\mathcal{E}$  (э.д.с.):

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}.$$

Можно говорить об электродвижущей силе на любом участке цепи. Это работа сторонних сил не во всем контуре, а только на данном участке. Э.д.с. гальванического элемента есть работа сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда *внутри элемента от одного полюса к другому*.

## 2. ЗАКОН ОМА

Электрический ток в металлах – это поток движущихся электронов. Движение электронов обусловлено существованием электрического поля в проводнике. Так как сила, с которой воздействует поле на электроны, зависит от напряженности  $E$  электрического поля, то можно предположить, что плотность тока  $j$  зависит от напряженности  $E$ .

Опыт показывает, что в случае слабых полей для большинства проводников хорошо соблюдается пропорциональность между плотностью тока и напряженностью внешнего поля:

$$j = \sigma E. \quad (11)$$

Данное соотношение носит название *закона Ома в дифференциальной форме для плотности тока*. Коэффициент пропорцио-



нальности  $\sigma$  называется *удельной проводимостью* (или электропроводностью).

Следует отметить, что так как в изотропном проводнике носители тока в каждой точке движутся в направлении вектора  $E$ , то направления  $j$  и  $E$  совпадают.

Выражение (11) – *закон Ома в дифференциальной форме* – связывает плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке.

Так как  $E$  определяется через градиент потенциала  $\varphi$  ( $E = -\frac{d\varphi}{dl}$ ), то закон Ома принимает вид

$$j = -\sigma \frac{d\varphi}{dl}.$$

В случае прямолинейного проводника постоянного сечения полный ток

$$I = jS = -\sigma S \frac{d\varphi}{dl} = -\sigma S \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} = \sigma S \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{\sigma S}{l} U.$$

Удельная проводимость  $\sigma$  есть величина, обратная удельному сопротивлению,

$$\rho = \frac{1}{\sigma}.$$

С учетом этого соотношения получим

$$I = \frac{S}{\rho l} U.$$

Величина  $\frac{S}{\rho l}$  характеризует проводимость проводника, а величина, обратная ей,

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

называется *сопротивлением проводника*. В случае однородного проводника (удельное сопротивление  $\rho = \text{const}$ ) сопротивление прямо пропорционально длине  $l$  и обратно пропорционально пло-

щади поперечного сечения  $S$ . Электрическое сопротивление проводников измеряется в *омах* (Ом).

Если последнее соотношение подставить в предыдущее, то закону Ома можно придать вид

$$I = \frac{U}{R}. \quad (12)$$

Уравнение (12) называется *законом Ома для участка цепи*. Справедливость его проверена многочисленными экспериментами и не вызывает сомнения. Из него следует, что *сила тока на участке цепи пропорциональна приложенному напряжению*. Коэффициентом пропорциональности в данном случае является величина  $1/R$ . Из уравнения (12) следует, что размерность ома будет

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{B}{A}.$$

Очень существенно заметить, что закон Ома (12) рассмотрен для *однородного* участка цепи, т.е. такого, в котором не действует э.д.с. (не действуют сторонние силы).

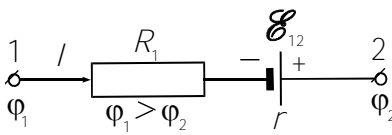


Рис. 2

На рис. 2 изображен *неоднородный участок цепи*, где действующая э.д.с. на участке 1-2 обозначена через  $\mathcal{E}_{12}$ , а приложенная на концах участка разность потенциалов — через  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Для такого участка

получают закон Ома в виде

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}}{R}. \quad (13)$$

Выражение (13) представляет собой *закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме*, который является *обобщенным законом Ома*.

Используя формулу (13), следует иметь виду, что вектор напряженности поля сторонних сил  $E_{ст}$  всегда направлен от «-» к «+». Поэтому при определении знака  $\mathcal{E}_{12}$  нужно пользоваться пра-

вилом: если направление  $E_{\text{ст}}$  совпадает с направлением тока в участке цепи, т.е. если *внутри источника* ток идет от «-» к «+», то  $\mathcal{E}_2$  считается положительной. В противном случае  $\mathcal{E}_2$  будет отрицательной.

Когда на данном участке цепи *источник тока отсутствует*, ( $\mathcal{E}_2 = 0$ ), то из (13) приходим к **закону Ома для однородного участка** цепи (12):

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R} = \frac{U}{R}.$$

При отсутствии сторонних сил напряжение на концах участка равно разности потенциалов, т.е.  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ . Если же электрическая цепь *замкнута*, то точки 1 и 2 совпадают, т.е.  $\varphi_1 = \varphi_2$ ; тогда из (13) получаем закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R},$$

где  $\mathcal{E}$  – э.д.с., действующая в цепи,  $R$  – суммарное сопротивление всей цепи. В общем случае  $R = R_1 + r$ , где  $R_1$  – сопротивление внешней цепи,  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока. Поэтому закон Ома для замкнутой цепи будет иметь вид

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}.$$

Если цепь *разомкнута* и, следовательно, в ней ток отсутствует ( $I = 0$ ), то из закона Ома (13) получим, что  $\mathcal{E}_2 = \varphi_1 - \varphi_2$ , т.е. э.д.с., действующая в разомкнутой цепи, равна разности потенциалов на ее концах. Следовательно, для того, чтобы найти э.д.с. источника тока, надо измерить разность потенциалов на его клеммах при разомкнутой цепи.

### 3. ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА

Если в металлическом проводнике течет постоянный ток и проводник остается неподвижным, то работа сторонних сил расходуется на его нагревание.

В металлических проводниках электрическая энергия, переданная источником тока, превращается в энергию хаотического движения атомов, т.е. в теплоту. Опыты подтверждают данное положение: *при прохождении тока по любому проводнику происходит выделение теплоты, равной работе, совершаемой электрическими силами по переносу заряда вдоль проводника.*

Пусть на концах участка проводника имеется разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ . Тогда работа по переносу заряда  $q$  на этом участке равна

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

По определению  $I = q/t$ . Откуда  $q = It$ , где  $t$  – время прохождения заряда, т.е.

$$A = IUt.$$

Если сила тока измеряется в амперах, напряжение – в вольтах, время – в секундах, то работа будет измеряться в джоулях:  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}$ .

Так как работа  $A$  идет на нагревание проводника, то можно написать, что выделяющаяся в проводнике теплота  $Q$  равна работе  $A$  электрических сил:

$$Q = A = IUt. \quad (14)$$

Данная формула носит название *закона Джоуля–Ленца*. Он был установлен английским физиком Дж. Джоулем в 1841 году и независимо от него русским физиком Э.Х. Ленцем в 1842 году.

В СИ работа и теплота измеряются в джоулях.

Используя закон Ома для участка цепи, перепишем формулу (14) следующим образом:

$$Q = A = IUt = I^2 Rt, \text{ или } Q = \frac{U^2}{R} t. \quad (15)$$

Следовательно, теплота, выделяющаяся в проводнике, зависит от сопротивления проводника, силы электрического тока в цепи и времени его прохождения.

Помимо нагревания проводника, энергия электрического тока может испытывать самые разнообразные превращения. Например, если во внешней цепи включен электродвигатель, то часть электрической энергии источника тока превращается в механическую.

Если во внешней цепи включены проводники второго рода (электролиты), то будет происходить превращение части энергии источника тока в химическую, и т.д. Если же внешняя цепь содержит только металлические проводники, то энергия источника тока превращается в теплоту, а если проводники имеют высокую температуру, то будет расходоваться и на значительное излучение.

Преобразуем закон Джоуля–Ленца в другой вид. Введем **плотность тепловой мощности**  $w$  – величину, равную энергии, выделенной за время  $t$  прохождения тока в каждой единице объема проводника:

$$w = \frac{Q}{S \cdot l \cdot t'}$$

где  $Q$  – теплота,  $S$  – поперечное сечение проводника,  $l$  – его длина.

Принимая во внимание, что  $Q = I^2 R \cdot t$ , а  $R = \rho \frac{l}{S}$ , получим

$$w = \frac{I^2 R \cdot t}{S \cdot l \cdot t} = \frac{I^2 \rho}{S^2}$$

Но  $\frac{I}{S} = j$  – плотность тока, а  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ , где  $\sigma$  – удельная проводимость; тогда

$$w = \frac{1}{\sigma} j^2,$$

или с учетом закона Ома в дифференциальной форме (11)

$$w = \sigma E^2 = jE. \quad (16)$$

Данное соотношение называется **законом Джоуля–Ленца в дифференциальной форме**; из него следует, что плотность тепловой мощности равна произведению удельной проводимости проводника на квадрат напряженности  $E$  электрического поля.

Формулы (15) можно использовать для расчета мощности  $N$  тока, равной работе электрических сил в единицу времени:

$$N = \frac{A}{t} = IU = I^2 R, \text{ или } N = \frac{U^2}{R}. \quad (17)$$

Мощность тока в СИ измеряется в ваттах:  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ В}$ .

Тепловое действие тока находит широкое применение в технике, которое началось с открытия в 1873 году русским инженером А.Н. Лодыгиным (1847–1923) лампы накаливания. На нагревании проводников электрическим током основано действие электрических муфельных печей, электрической дуги (открыта русским инженером В.В. Петровым (1761–1834)), контактной электросварки, бытовых электронагревательных приборов и т.д.

К нежелательным последствиям теплового действия тока относятся значительные потери электрической энергии в проводах линий электропередач, а также разрушение изоляции проводов от нагревания.

#### 4. ВЫВОД ЗАКОНОВ ОМА И ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ ПО КЛАССИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ МЕТАЛЛОВ

Рассмотрим электрический ток в металлических проводниках, внутри которых существует электрическое поле с напряженностью  $E$ . Это поле действует на электроны проводимости с силой  $F = eE$ , сообщая им ускорение  $a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}$ , где  $m$  – масса электрона.

Если бы движение электронов в металле происходило без потерь энергии, то их скорость, а следовательно, и сила тока в проводнике со временем увеличивались бы. Однако при столкновениях с атомами вещества, совершающими беспорядочное тепловое движение, электроны теряют часть своей кинетической энергии.

При *постоянном* токе, когда средняя скорость упорядоченного движения электронов остается со временем неизменной, вся энергия, получаемая электронами под действием электрического поля, должна быть передана атомам вещества, т.е. перейти в энергию их теплового движения.

Для простоты рассуждений предположим, что при каждом столкновении электрон полностью теряет ту энергию, которую он получил под действием силы  $F = eE$  за время свободного пробега  $t$  от одного столкновения до другого. Это означает, что в начале

каждого свободного пробега электрон имеет только скорость своего теплового движения  $u$ , а в конце пробега, перед столкновением, его скорость под действием силы  $F = eE$  увеличивается на некоторую величину  $v_1$ . Отвлекаясь от теплового движения, можно полагать, что перемещение электрона в направлении действия силы  $F = eE$  является равноускоренным с начальной скоростью  $v_0 = 0$ . За время свободного пробега электрон приобретает скорость **упорядоченного движения**  $v_1 = a\tau = \frac{eE}{m}\tau$ , а **средняя скорость** этого движения

$$v = \frac{v_0 + v_1}{2} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E\tau.$$

Время свободного пробега определяется **средней скоростью беспорядочного (теплового) движения электрона  $u$  и средней длиной свободного пробега  $\lambda$** :  $\tau = \frac{\lambda}{u}$ . Тогда плотность тока в металлическом проводнике

$$j = nev = \frac{1}{2} \frac{ne^2}{m} \frac{\lambda}{u} E = c'E.$$

Так как ни один из множителей коэффициента  $c'$  не зависит от напряженности поля, то плотность тока оказывается пропорциональной напряженности  $E$  внешнего электрического поля. Данный вывод, следующий из электронной теории проводимости металлов, идентичен закону Ома (11):

$$j = \sigma E.$$

Из сравнения этих двух формул следует, что величина

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{ne^2}{m} \frac{\lambda}{u} \quad (18)$$

характеризует свойства проводника и называется его **удельной электрической проводимостью** (электропроводностью).

Энергию  $W_1$ , приобретаемую одним электроном за время  $t$  под действием силы  $F = eE$ , можно рассчитать, умножив  $\frac{mv_1^2}{2}$  на число свободных пробегов за время  $t$ , т.е. на  $\frac{t}{\tau}$ :

$$W_1 = \frac{mv_1^2}{2} \cdot \frac{t}{\tau} = \frac{m}{2} \left( \frac{eE}{m} \tau \right)^2 \frac{t}{\tau} = \frac{e^2}{2m} \tau E^2 t.$$

При постоянном токе вся эта энергия передается веществу проводника и переходит в тепловое движение его атомов. Рассчитаем энергию, которая в единицу времени передается единице объема проводника, содержащего  $n$  свободных электронов:

$$w = \frac{nW_1}{t} = \frac{1}{2} \frac{ne^2}{m} \tau E^2 = \sigma E^2,$$

или, так как  $\sigma E$  равна плотности тока, то

$$w = \sigma E^2 = jE.$$

Формула  $j = \sigma E$  выражает **закон Ома**, а формула  $w = \sigma E^2 = jE$  – **закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме**. Приведенный выше вывод этих законов сделан на основе так называемой **классической электронной теории проводимости металлов**. Эта теория утверждает, что в металлах имеется некоторое количество свободных электронов («электронный газ»), которые перемещаются в пределах объема проводника, но не могут покинуть этот объем. Для электронного газа поверхность металла представляет собой как бы «стенки сосуда». Физически это означает, что на поверхности металла для электронов существует особый **потенциальный барьер**, т.е. при переходе через поверхностный слой на электроны действуют значительные силы, направленные внутрь объема металла. Для того чтобы преодолеть этот «барьер», электроны должны обладать достаточной кинетической энергией.

Итак, с помощью модели электронного газа были теоретически выведены два важных закона. Следовательно, можно сделать вывод, что эта модель в общих чертах верна. Но попытки расширения



области применения этой теории и ее дальнейшего развития приводили к непреодолимым противоречиям с опытом (экспериментом), выход из которых был найден в *квантовой электронной теории металлов*.

## 5. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОВ ОМА И ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Исследование основных законов электрического тока проведем в металлическом прямолинейном проводнике из нихрома длиной  $l$  и постоянным сечением  $S$ .

Плотность тока в таком проводнике будет

$$j = \frac{I}{S},$$

где  $I$  – сила тока.

Так как проводник прямолинейный с постоянным сечением, то электрическое поле внутри проводника можно считать однородным. Тогда напряженность электрического поля согласно (10) выражается по формуле

$$E = \frac{U}{l},$$

где  $U$  – напряжение (разность потенциалов) на концах проводника.

Для плотности тепловой мощности электрического тока в данном проводнике можно использовать

$$w = \frac{IU}{V} = \frac{IU}{Sl},$$

где  $V = Sl$  – объем исследуемого проводника.

С учетом сказанного, закон Ома в дифференциальной форме  $j = \sigma E$  можно записать в виде

$$\frac{I}{S} = \sigma \frac{U}{l}, \quad (19)$$

а закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме  $w = \sigma E^2$  в виде

$$\frac{IU}{Sl} = \sigma \left( \frac{U}{l} \right)^2. \quad (20)$$

Для исследований используем установку, эквивалентная схема которой показана на рис. 3. Так как сопротивление вольтметра  $R_V$  намного больше сопротивления исследуемого проводника  $R_{пр}$ , то ток, измеряемый миллиамперметром, будет практически равен току, проходящему через проводник

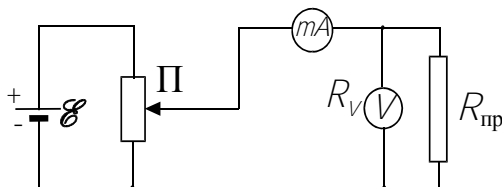


Рис. 3

Измерив ряд значений силы тока  $I$  и соответствующих напряжений  $U$  в проводнике и зная постоянные величины  $\sigma$ ,  $l$  и  $S$ , можно вычислить левые и правые части формул (19) и (20).

Вычисления покажут, что равенства (19) и (20) выполняются, то есть наш эксперимент подтверждает законы Ома и Джоуля–Ленца, записанные в дифференциальной форме.

## 6. ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Включить установку в сеть переменного тока напряжением 220В. Для этого вставить вилку шнура в сеть и нажать на передней панели прибора клавишу  $И_1$ .

2. Для выполнения измерений выбрать метод точного измерения напряжения путем нажатия переключателей  $И_2$  и  $И_3$ .

3. Выяснить цену деления электроизмерительных приборов.

## 7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить длину  $l$  исследуемого проволочного сопротивления, вычислить его площадь поперечного сечения  $S = \pi d^2/4$ , где

$d = 0,36 \cdot 10^{-3}$  м. Удельная электропроводность для исследуемого проводника из *нихрома*  $\sigma = 0,85 \cdot 10^6$  Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$ .

2. Потенциометром регулировки тока Р1 установить первое значение силы тока, указанное в таблице. Снять с вольтметра показание напряжения и записать в таблицу:

Таблица

№ столбца \ № измерения	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
	$I, \text{ mA}$	$U, \text{ В}$	$\frac{U}{I}, \frac{\text{В}}{\text{м}}$	$\left(\frac{U}{I}\right)^2$	$\frac{I}{S}, \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$	$\sigma \frac{U}{I}$	$\frac{IU}{S \cdot I}$	$\sigma \left(\frac{U}{I}\right)^2$
1	100							
2	130							
3	160							
4	190							
5	220							

3. Вращая ручку Р1 потенциометра, установить поочередно все значения силы тока, указанные в таблице, и снять соответствующие показания вольтметра для напряжения.

4. Сразу после завершения измерений выключить установку.

5. Выполнить математическую обработку экспериментальных данных в системе СИ с учетом требований таблицы.

6. Сделать анализ результатов эксперимента согласно выражений (19) и (20), а также вывод о выполнении законов Ома и Джоуля–Ленца в дифференциальной форме. Для этого сравнить равенство соответствующих значений в столбцах V и VI (см. таблицу) для закона Ома и равенство соответствующих значений в столбцах VII и VIII для закона Джоуля–Ленца.

### ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Назвать основные характеристики электрического тока и условия его существования.

2. Что такое сила тока и плотность тока?

3. Объяснить назначение и действие источника тока в электрической цепи.
4. Записать и сформулировать законы Ома и Джоуля–Ленца в дифференциальной форме.
5. Вывести закон Ома в дифференциальной форме по классической теории металлов.
6. Вывести закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме по классической теории металлов.
7. Объяснить метод исследования законов Ома и Джоуля–Ленца в дифференциальной форме.
8. Нарисовать эквивалентную схему установки и объяснить выполнение лабораторной работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И.Трофимова. – М.: Высшая школа, 1999. – § 96, 98, 99.
2. Шубин, А.С. Курс общей физики / А.С. Шубин. – М.: Высшая школа, 1976. – § 1, 2, 3, 4 в гл. 8.
3. Геворкян, Р.Г. Курс физики / Р.Г.Геворкян. – М.: Высшая школа, 1979. – § 8, 9 в гл. 2, ч. III.
4. Позняк, В.С. Определение удельного сопротивления и удельной электропроводности проводника / В.С. Позняк. – Минск: БНТУ, 2010. – § 5.
5. Позняк, В.С. Определение коэффициента теплопроводности металлического проводника / В.С. Позняк, А.А.Баранов. – Минск: БНТУ, 2011. – § 5.

Учебное издание

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ОМА И ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Методические указания к лабораторной работе по физике  
для студентов строительных специальностей

С о с т а в и т е л и :

ПОЗНЯК Владимир Сергеевич  
БАРАНОВ Артур Александрович

---

Компьютерная верстка Е.Л. Федорова, Е.К. Соловьева

Подписано в печать 11.07.2011.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. л. 0,95. Тираж 100. Заказ 569.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.