

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра физики

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ УПОРЯДОЧЕННОГО
И ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ,
ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ
ПРОВОДНИКЕ

Методические указания к лабораторной работе по физике
для студентов строительных специальностей

Минск
БНТУ
2014

УДК 537.31(075.6)
ББК 22.33я7
И88

Составители:

В. С. Позняк, А. А. Баранов

Рецензенты:

И. А. Сатиков, В. И. Кудин

В методических указаниях рассмотрены природа носителей тока, их концентрация в металлах, скорости теплового и упорядоченного движений электронов в металлических проводниках, а также характеристики и условия существования тока. Изложена электронная теория электропроводности металлов. Дана методика экспериментального исследования скоростей упорядоченного и теплового движений электронов, их концентрации в металлическом проводнике.

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

Оглавление

1. Природа носителей тока в металлах.	4
2. Скорости теплового и упорядоченного движений электронов в металлических проводниках.	5
3. Характеристики и условия существования электрического тока.	7
4. Электронная теория электропроводности металлов.	12
5. Методика исследования скоростей упорядоченного и теплового движений электронов, их концентрации в металлическом проводнике.	14
6. Подготовка установки к работе.	16
7. Порядок выполнения работы.	16
Вопросы к зачету.	17
Литература.	18

Цель работы:

1. Ознакомиться с явлением электрического тока, выяснить основные характеристики и закономерности, а также условия существования электрического тока.
2. Экспериментально исследовать скорости упорядоченного и теплового движений электронов, их концентрацию в металлическом проводнике.

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

1. Природа носителей тока в металлах

Носителями тока в металлах являются свободные электроны, т.е. электроны, слабо связанные с ионами кристаллической решетки металла. Это представление о природе носителей тока в металлах основывается на электронной теории проводимости металлов, созданной немецким физиком П.Друде и разработанной впоследствии нидерландским физиком Х.Лоренцем, а также на ряде классических опытов, подтверждающих положения электронной теории.

Отметим прежде всего опыт Рикке (немецк.), осуществленный в 1901 году. В этом опыте электрический ток пропускался в течение года через три последовательно соединенных с тщательно отшлифованными торцами металлических цилиндра (Cu, Al, Cu) одинакового радиуса. Хотя общий заряд, прошедший через эти цилиндры, был огромным ($\sim 3,5 \cdot 10^6$ Кл), никаких, даже микроскопических следов переноса вещества не обнаружилось. Это явилось экспериментальным доказательством того, что ионы в металлах не участвуют в переносе электричества, а перенос заряда в металлах осуществляется частицами, которые являются *общими для всех металлов*. Такими частицами могли быть открытые в 1897 г. английским физиком Д.Томсоном электроны.

Для доказательства этого предположения необходимо было определить знак и величину удельного заряда носителей (отношение заряда носителя к его массе). Идея подобных опытов заключа-

лась в следующем: если в металле имеются подвижные, слабо связанные с решеткой носители тока, то при резком торможении проводника эти частицы должны по инерции смещаться вперед, как смещаются вперед пассажиры, сидящие в вагоне при его торможении. Результатом смещения должен быть импульс тока; по направлению тока можно определить знак носителей тока, а зная размеры и сопротивление проводника, можно вычислить удельный заряд носителей. Идея этих опытов (1913 г.) и их качественное воплощение принадлежит российским физикам С.Л. Мандельштаму и Н.Д. Папалекси. Эти опыты в 1916 году были проведены также американским физиком Р. Толменом и ранее шотландским физиком Б. Стюартом. Ими экспериментально доказано, что носители тока в металлах имеют отрицательный знак, а их удельный заряд приблизительно одинаков для всех исследованных металлов. По значению удельного заряда носителей электрического тока и по определенному ранее Р. Миллиkenом элементарному электрическому заряду была определена их масса. Оказалось, что значения удельного заряда и массы носителей тока в металле и электронах, движущихся в вакууме, совпадали. Таким образом, было окончательно доказано, что *носителями электрического тока в металлах являются свободные электроны или электроны проводимости.*

Существование свободных электронов в металлах можно объяснить следующим образом: при образовании кристаллической решетки (в результате сближения изолированных атомов) валентные электроны, сравнительно слабо связанные с атомными ядрами, отрываются от атомов металла, становятся «свободными» и могут перемещаться по всему объему. Таким образом, в узлах кристаллической решетки располагаются ионы металла, а между ними хаотически движутся свободные электроны, образуя своеобразный *электронный газ*, обладающий, согласно электронной теории металлов, *свойствами идеального газа.*

Если от каждого атома отщепляется по одному электрону, то концентрация свободных электронов (т.е. их число n в единице объема) будет равно количеству атомов в единице объема. Произведем оценку n . Число атомов в единице объема равно

$$n = \frac{N_A}{V_\mu} = \frac{\rho}{\mu} N_A, \quad (1)$$

где N_A – число Авогадро, т.е. число атомов в одном моле, $V_\mu = \frac{\mu}{\rho}$ – объем моля, μ – молярная масса, ρ – плотность.

Для металлов значения $\frac{\rho}{\mu}$ заключены в пределах от 20 кмоль/м³ (для калия) до 200 кмоль/м³ (для бериллия). Следовательно, для концентрации свободных электронов (электронов проводимости) получаются значения порядка

$$n = 10^{28} \div 10^{29} \text{ м}^{-3}. \quad (2)$$

2. Скорости теплового и упорядоченного движений электронов в металлических проводниках

Исходя из представлений о свободных электронах, Друде предположил, что электроны проводимости в металле ведут себя подобно молекулам идеального газа. В промежутках между соударениями они движутся совершенно свободно, пробегая в среднем некоторый путь λ . В отличие от молекул газа, пробег которых определяется соударениями молекул друг с другом, электроны сталкиваются преимущественно не между собой, а с ионами, образующими кристаллическую решетку металла. Эти столкновения приводят к установлению теплового равновесия между электронным газом и кристаллической решеткой. По теории Друде-Лоренца, электроны обладают такой же энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного газа. Поэтому, применяя выводы молекулярно-кинетической теории, оценку *средней скорости теплового движения электронов* можно произвести по формуле

$$v_T = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, m_e – масса электрона. При $T = 300$ К средняя скорость теплового движения электронов v_T равна $1,1 \cdot 10^5$ м/с.

При наложении внешнего электрического поля на металлический проводник кроме теплового движения возникает их упорядоченное движение, т.е. возникает электрический ток. **Среднюю скорость v упорядоченного движения электронов** можно оценить согласно формуле для плотности тока:

$$j = nev. \quad (4)$$

Выбрав допустимую плотность тока, например для медных проводов $j = 10^7$ А/м², получим, что при концентрации носителей тока $n = 8 \cdot 10^{28}$ м⁻³ средняя скорость v упорядоченного движения электронов равна $7,8 \cdot 10^{-4}$ м/с. Следовательно, $v \ll v_T$, т.е. даже при очень больших плотностях тока средняя скорость упорядоченного движения электронов, обуславливающего электрический ток, значительно меньше их скорости теплового движения. Поэтому при вычислениях модуль результирующей скорости ($v_T + v$) можно заменить модулем скорости теплового движения v_T .

Полученный результат, казалось бы, противоречит факту практического мгновенной передачи электрических сигналов на большие расстояния. А дело в том, что замыкание электрической цепи влечет за собой распространение электрического поля со скоростью c

($c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Через время $t = \frac{l}{c}$ (l – длина цепи) вдоль цепи

установится стационарное электрическое поле и в этой цепи начнется упорядоченное движение электронов. Поэтому электрический ток возникнет в цепи практически одновременно с ее замыканием.

Подводя итог, отметим следующее. Электроны металла участвуют в хаотическом движении, равновероятном во всех направлениях. При наложении внешнего электрического поля, испытывая действие его сил, электроны начинают дрейфовать в сторону, противоположную напряженности поля. Кроме хаотического они те-

перь совершают направленное движение, представляющее собой электрический ток. Средняя скорость этого направленного движения мала, она порядка миллиметра в секунду.

3. Характеристики и условия существования электрического тока

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 j и напряженностью внешнего поля E :

$$j = \sigma E. \quad (5)$$

Данное соотношение носит название *закона Ома в дифференциальной форме для плотности тока*. Коэффициент пропорциональности σ называется *удельной электропроводностью*. Выражение (5) получено как в классической теории электропроводности металлов Друде-Лоренца, так и в квантовой теории.

За направление тока в металлических проводниках в физике и технике принимается направление движения положительных зарядов. Это несоответствие возникло вследствие того, что электронная теория появилась значительно позднее открытия явления электрического тока. Поскольку само по себе обозначение символом «+» и «-» условно, изменение этой условности не внесло бы никаких принципиальных изменений в технические расчеты и представления, но вызвало бы осложнения в практическом осуществлении технических расчетов.

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 пере-

мещение 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.

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (6)$$

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

$$I = \frac{q}{t}. \quad (7)$$

В международной системе единиц (СИ) единица силы тока является основной. Она носит название **ампер** и определяется из взаимодействия двух токов. Из равенства (7) 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

$$dq = nevSdt. \quad (8)$$

Тогда сила тока будет

$$I = \frac{dq}{dt} = nevS. \quad (9)$$

Заметим, что сила тока есть, по определению, скалярная величина; знак скалярного произведения $\mathbf{v}S = vS \cos \alpha$ зависит от угла α 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

$$j = \frac{dI}{dS} . \quad (10)$$

В случае постоянного тока

$$j = \frac{I}{S} = \frac{q}{S \cdot t} . \quad (11)$$

Учитывая выражение (9), получим

$$j = nev , \quad (12)$$

а в векторной форме

$$\mathbf{j} = nev . \quad (13)$$

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 А/м².

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

$$I = \int_S j_n ds , \quad (14)$$

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 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, которая создает внутри него электрическое поле E , направленное в сторону падения потенциала, то

$$E = -\frac{d\varphi}{dl} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l} . \quad (15)$$

При этом в проводнике возникает электрический ток, который идет от большего потенциала (φ_1) к меньшему (φ_2).

Движение зарядов от φ_1 к φ_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 φ , а отрицательные – в сторону убывания φ , т.е.

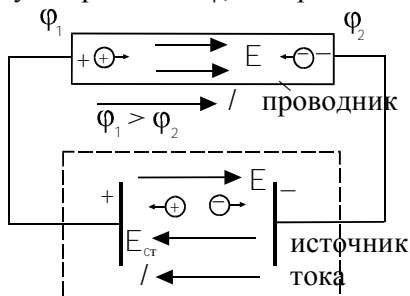


Рис. 1

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**.

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 движутся 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 осуществлять 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.):

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

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*.

4. Электронная теория электропроводности металлов

Исходя из представлений о свободных электронах, Друде разработал классическую теорию металлов, которая затем была усовершенствована Лоренцем. В классической электронной теории металлов предполагается, что движение электронов подчиняется законам Ньютона. В этой теории пренебрегают взаимодействием электронов между собой, а взаимодействие электронов с положительными ионами решетки сводят только к соударениям. Предполагается, что все электроны проходят между двумя последовательными соударениями одинаковые пути, равные средней длине свободного пробега электронов λ . Далее предполагается, что при каждом соударении электрон передает решетке накопленную энергию полностью и поэтому после соударения начинает движение без начальной скорости.

Рассмотрим электрический ток в металлических проводниках, внутри которых существует электрическое поле с напряженностью E . Это поле действует на электроны проводимости с силой $F = eE$,

сообщающей 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 τ от одного столкновения до другого. Это означает, что в начале каждого свободного пробега электрон имеет только скорость своего теплового движения v_T , 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 упорядоченного движения*

$$v = \frac{v_0 + v_1}{2} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E\tau. \quad (16)$$

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

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

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 (5):

$$j = \sigma E.$$

Из сравнения этих двух формул следует, что величина

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{n e^2 \lambda}{m v_T} \quad (17)$$

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

Кроме закона Ома, классическая электронная теория смогла объяснить закон Джоуля-Ленца, а также дала качественное объяснение закона Видемана-Франца.

Однако попытки расширения области применения этой теории и ее дальнейшего развития привели к непреодолимым противоречиям с опытом (экспериментом). Представление о том, что «электронный газ» в металлах хотя бы в первом приближении можно рассматривать как идеальный газ, заключенный в объеме данного металлического тела, оказалось неприемлемым. Свойства электронного газа внутри металлов существенно отличаются от свойств обыкновенных газов и рассматриваются в *квантовой электронной теории металлов*.

5. Методика исследования скоростей упорядоченного и теплового движений электронов, их концентрации в металлическом проводнике

В явлении электрического тока в металлических проводниках важными физическими величинами являются скорость упорядоченного движения, скорость теплового движения электронов проводимости, а также их концентрация. Исследование этих величин проведем в металлическом прямолинейном проводнике из нихрома длиной l и постоянным сечением S .

Плотность тока в таком проводнике будет

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

Так как проводник прямолинейный с постоянным сечением, то электрическое поле внутри проводника можно считать

однородным. Тогда напряженность электрического поля согласно (15) выражается по формуле

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

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

Исходя из электронной теории проводимости металлов, среднюю скорость упорядоченного движения электронов проводимости можно оценить согласно (16) по формуле

$$v = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E \tau = \frac{e}{2m} \frac{U}{l} \tau, \quad (18)$$

где время свободного пробега электронов для металлов принимают $\tau \approx 3 \cdot 10^{-15}$ с [3], а среднюю скорость теплового движения согласно (3) по формуле

$$v_T = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}. \quad (19)$$

Плотность тока согласно (12) равна

$$j = nev.$$

Тогда концентрация электронов проводимости будет

$$n = \frac{j}{e v} = \frac{I}{S e v} = \frac{2 I l m}{S e^2 U \tau}. \quad (20)$$

Для проведения экспериментальных исследований используем установку, эквивалентная схема которой показана на рис. 2. Так как сопротивление вольтметра R_V намного больше сопротивления исследуемого проводника $R_{пр}$, то ток, измеряемый миллиамперметром, будет практически равен току, проходящему через сопротивление $R_{пр}$.

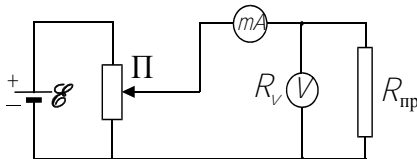


Рис.2

Измерив ряд значений силы тока I и соответствующих напряжений U в проводнике и зная постоянные величины, входящие в формулы (18), (19) и (20), можно определить искомые v , v_T , n .

Для концентрации n желательно выполнить вычисления и по формуле (1), чтобы сравнить с экспериментальным результатом.

Результаты экспериментальных исследований величин v , v_t , n сравнить со справочными данными.

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 $W1$.
2. Для выполнения измерений выбрать метод точного измерения напряжения путем нажатия переключателей $W2$ и $W3$.
3. Выяснить цену деления электроизмерительных приборов.

7. Порядок выполнения работы

1. Измерить длину l исследуемого проволочного сопротивления, вычислить его площадь поперечного сечения $S = \pi d^2/4$, $d = 0,36 \cdot 10^{-3}$ м. Время свободного пробега электронов для исследуемого проводника из **нихрома** принять $\tau = 3 \cdot 10^{-15}$ с, заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, его масса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, абсолютная температура T – комнатная.
2. Потенциометром регулировки тока $P1$ 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
	I , мА	U , В	$\frac{l}{S}$, $\frac{A}{m^2}$	$\frac{U}{l}$, $\frac{B}{m}$	v , м/с	n , m^{-3}	v_t , м/с
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, используя формулы (18), (19), (20).
6. Вычислить также концентрацию носителей тока n согласно (1). Принять молярную массу никрома $\mu = 56 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а плотность $\rho = 8,2 \cdot 10^3$ кг/м³. $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль.
7. Сделать анализ результатов эксперимента, сравнив значения v и v_T и оценив значение n . Сравнить результаты эксперимента со справочными данными для исследуемых величин, приведенными в теоретической части методических указаний.

Вопросы к зачету

1. Что подтверждает природу носителей тока в металлах?
2. Какие скорости имеют электроны проводимости в металлических проводниках?
3. Почему тепловое движение электронов не может привести к возникновению электрического тока?
4. Назвать основные характеристики электрического тока и условия его существования.
5. Что такое сила тока и плотность тока?
6. Объяснить назначение и действие источника тока в электрической цепи.
7. Вывести на основе классической электронной теории электропроводности металлов закон Ома в дифференциальной форме.
8. Объяснить метод экспериментального исследования скоростей упорядоченного и теплового движений электронов, их концентрации в металлическом проводнике.
9. Нарисовать эквивалентную схему установки и объяснить порядок выполнения лабораторной работы.

Литература

1. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1999. – § 96, 102.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики. Электричество / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1973. – § 69, 70.
3. Шубин, А.С. Курс общей физики / А.С. Шубин. – М.: Высшая школа, 1976. – § 1, 2, 5 в гл. 8.
4. Геворкян, Р.Г. Курс физики / Р.Г. Геворкян. – М.: Высшая школа, 1979. – § 8, 9 в гл. 2, ч. III.
5. Позняк, В.С. Определение удельного сопротивления и удельной электропроводности проводника / В.С. Позняк. – Мн.: БНТУ, 2010. – § 2.
6. Позняк, В.С. Исследование законов Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной форме / В.С. Позняк, А.А. Баранов. – Мн.: БНТУ, 2011. – § 1,2,4,5.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ УПОРЯДОЧЕННОГО
И ТЕПЛОГО ДВИЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ,
ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ
ПРОВОДНИКЕ**

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

Технический редактор *О. В. Песенько*

Подписано в печать 10.12.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,10. Уч.-изд. л. 0,86. Тираж 100. Заказ 365.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.