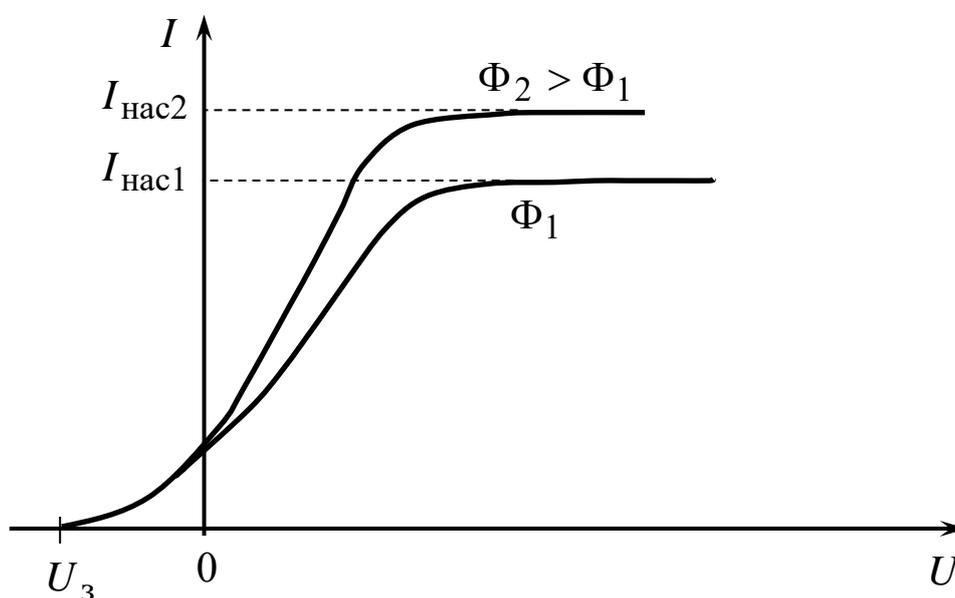


В.А. Самолетов

Е.В. Тамбулатова

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА**



Санкт-Петербург
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.А. Самолетов

Е.В. Тамбулатова

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА
Учебно-методическое пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2017

УДК 530

Самолетов В. А., Тамбулатова Е.В. Физика. Лабораторные работы по физике твердого тела: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 71 с.

Предложена методика проведения лабораторных работ и обработки результатов измерений.

Предназначены для студентов направлений бакалавриата: 01.03.02, 09.03.01, 09.03.02, 09.03.03, 09.03.04, 10.03.01, 11.03.02, 11.03.03, 12.03.01, 12.03.02, 12.03.03, 12.03.05, 13.03.02, 14.03.01, 15.03.02, 15.03.04, 15.03.06, 16.03.01, 16.03.03, 18.03.02, 18.03.04, 19.03.01, 19.03.02, 19.03.03, 23.03.02, 23.03.03, 27.03.04, 27.03.05, 12.05.01 очной и заочной формы обучения.

Рекомендовано к печати Советом естественнонаучного факультета протокол №1 от 24.01.2017 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017

© Самолетов В.А., Тамбулатова Е.В., 2017

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № ФТТ-1

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Получить экспериментальную температурную зависимость электрического сопротивления металла и полупроводника.
2. Определить значение температурного коэффициента сопротивления для металла и полупроводника.

ВВЕДЕНИЕ

Металлы и полупроводники имеют различную зависимость электрического сопротивления от температуры.

По теории электропроводности в области температур от -50 до 150 °С:

– электрическое сопротивление металлов линейно возрастает с увеличением температуры

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - 273)],$$

где R_0 – электрическое сопротивление при $T = 273$ К; α – температурный коэффициент сопротивления; T – температура по шкале Кельвина;

– электрическое сопротивление полупроводников экспоненциально уменьшается с увеличением температуры

$$R = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right),$$

где R_0 – электрическое сопротивление при $T \rightarrow \infty$; B – постоянная температурной чувствительности.

Температурный коэффициент сопротивления определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Описание стенда

Работа выполняется на лабораторном стенде, в состав которого входят: блок питания и управления (стоит у стены), блок исследуемых образцов (лежит на столе) и цифровой мультиметр. Общий вид лабораторного стенда показан на рис. 1.

Металлический и полупроводниковый образцы расположены в термостате блока исследуемых образцов, который нагревается с помощью электрического нагревателя. Разность температур между термостатом и помещением измеряется термопарой, подключенной к стрелочному измерительному прибору в блоке питания и управления.

Для измерения сопротивления металла и полупроводника при различных температурах используется цифровой измерительный прибор – мультиметр, включенный в режим измерения сопротивлений.

Подключение металлического и полупроводникового образцов к цифровому мультиметру производится с помощью кнопок R_M и $R_{П/П}$ на блоке исследуемых образцов.

Для контроля тока, протекающего через нагреватель, используется амперметр.

Для измерения сопротивления металла цифровой мультиметр следует переключить на предел измерения 200 Ом (рис. 2).

Для измерения сопротивления полупроводника цифровой мультиметр следует переключить на предел измерения 20 кОм (рис. 3).

Подготовка стенда к работе

1. Проверить, чтобы на торцевой (задней) стороне блока исследуемых образцов (лежит на столе) кабель был включен в первый разъем слева.

2. Плавно повернуть ручку «Регулятор тока» против часовой стрелки до упора.

3. Включить блок питания и управления (стоит у стены) с помощью тумблера «Сеть» (при этом должны загореться индикаторная лампа и надпись НАГРЕВ).

4. Поворотом ручки включить цифровой мультиметр на предел измерения 20 кОм (см. рис. 3).

5. Нажать кнопку $R_{п/п}$ на блоке исследуемых образцов.

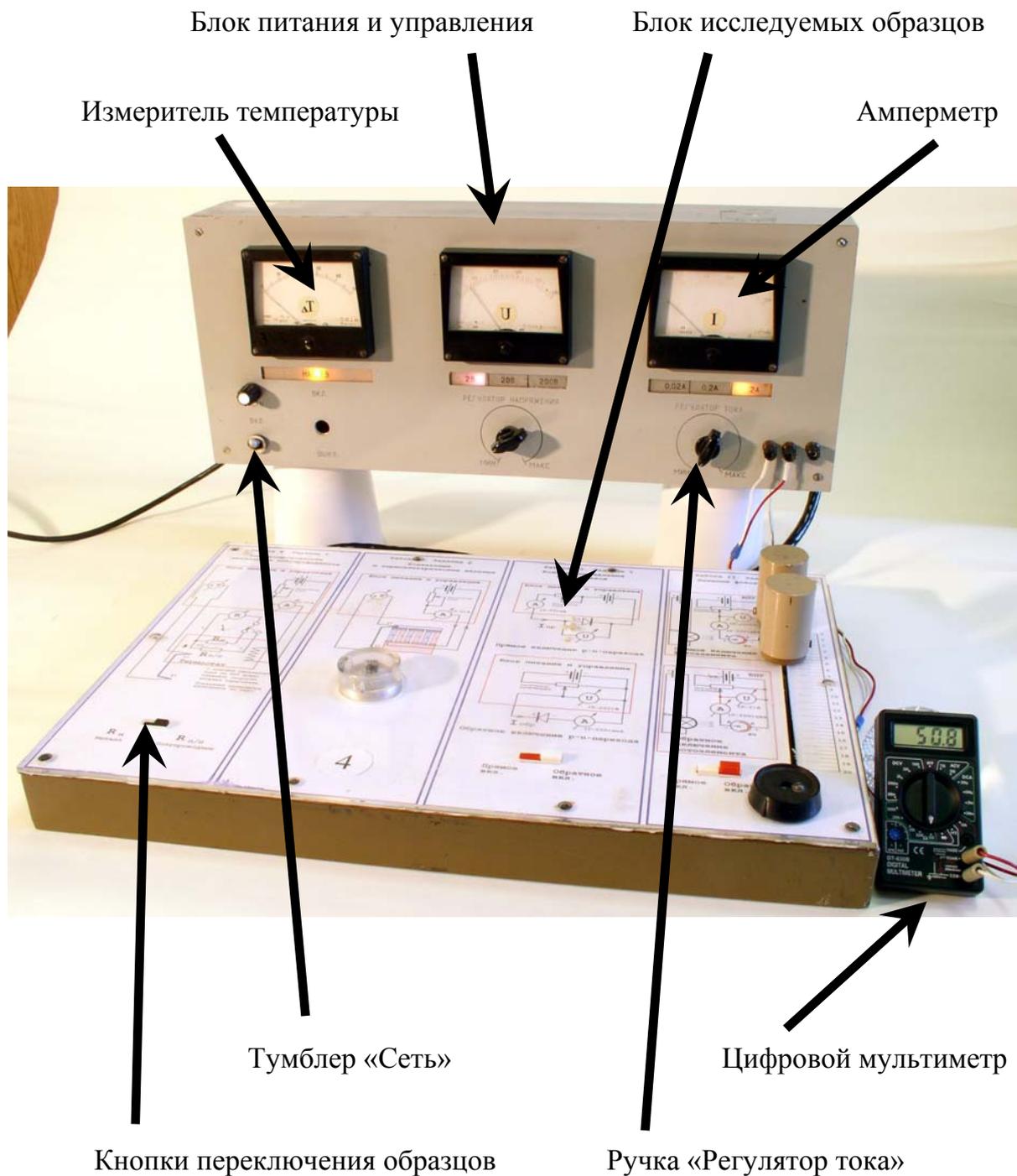


Рис. 1. Общий вид лабораторного стенда



Рис. 2. Цифровой мультиметр, включенный на предел измерения 200 Ом



Рис. 3. Цифровой мультиметр, включенный на предел измерения 20 кОм

Выполнение измерений

1. Заполнить таблицу средств измерения (табл. 1).

Таблица 1

Средства измерения

Средство измерения	Предел измерения	Цена деления	Погрешность
Спиртовой термометр			
Электронный термометр			
Омметр	200 Ом		
Омметр	20 кОм		

2. По термометру, установленному в лаборатории, измерить температуру воздуха T_0 в лаборатории. Записать измеренную температуру перед табл. 2.

3. Измерить сопротивление образцов при комнатной температуре ($\Delta T = 0$ К).

Нажать кнопку $R_{п/п}$ на блоке исследуемых образцов. Поворотом ручки включить цифровой мультиметр на предел измерения 20 кОм (см. рис. 3). Измерить по цифровому мультиметру сопротивление полупроводникового образца. Записать результаты измерений в табл. 2.

Нажать кнопку R_m на блоке исследуемых образцов. Поворотом ручки включить цифровой мультиметр на предел измерения 200 Ом (см. рис. 2). Измерить по цифровому мультиметру сопротивление металлического образца. Записать результаты измерений в табл. 3.

4. На цифровом мультиметре установить предел измерения 20 кОм.

5. Подключить к цифровому мультиметру полупроводниковый образец, для чего нажать кнопку $R_{п/п}$ на блоке исследуемых образцов.

6. С помощью ручки «Регулятор тока» установить максимально возможное значение тока, протекающего через нагреватель.

При этом температура в термостате начнет увеличиваться.

7. Измерить сопротивление полупроводникового образца при различных значениях температуры в диапазоне от $\Delta T = 0$ К до

$\Delta T = 40$ К примерно через каждые 5 К в режиме монотонного нагрева образца.

Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

Полупроводниковый образец

$$T_0 = \dots \text{ К}$$

ΔT , К	$R_{\text{п}}$, Ом	$T = T_0 + \Delta T$, К	$\frac{1}{T}$, К ⁻¹	$\ln R_{\text{п}}$
0				
5				
10				
и т. д. до 40 К				

8. При достижении температуры образца $\Delta T = 41 - 43$ К выключить ток через нагреватель. Для этого следует плавно повернуть ручку «Регулятор тока» против часовой стрелки до упора.

Температура в термостате начнет уменьшаться.

9. Подключить к цифровому мультиметру металлический образец, для чего нажать кнопку $R_{\text{м}}$ на блоке исследуемых образцов.

10. На цифровом мультиметре установить предел измерения 200 Ом.

11. Измерить сопротивление металлического образца при различных значениях температуры в диапазоне от $\Delta T = 40$ К до $\Delta T = 0$ К примерно через каждые 5 К в режиме монотонного охлаждения образца.

Результаты измерений записать в табл. 3.

Таблица 3

Металлический образец

$$T_0 = \dots \text{ К}$$

ΔT , К	$R_{\text{м}}$, Ом	$T = T_0 + \Delta T$, К
0		
5		
10		
и т. д. до 40 К		

- 12.** По окончании измерений выключить стенд. Для этого:
- выключить блок питания и управления (стоит у стены) с помощью тумблера «Сеть»;
 - выключить цифровой мультиметр (переключатель пределов измерения поставить в положение «OFF»).

Внимание! Результаты измерений должны быть подписаны преподавателем кафедры физики (в противном случае работа считается невыполненной).

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать температуру образцов T , а также $1/T$ и $\ln R_{\Pi}$. Результаты занести в таблицы.

2. По данным табл. 3 построить график зависимости сопротивления металла от температуры $R_M = f(T)$. Зависимость должна быть линейной.

3. Из графика зависимости $R_M = f(T)$ определить R_0 – электрическое сопротивление при температуре $T = 273$ К. Значение R_0 находим линейной экстраполяцией графика в точку $T = 273$ К.

4. Из графика зависимости $R_M = f(T)$ определить температурный коэффициент электрического сопротивления по следующей формуле:

$$\alpha_M = \frac{R_2 - R_1}{R_0 (T_2 - T_1)},$$

где R_0 – электрическое сопротивление при температуре $T = 273$ К; R_1, R_2, T_1, T_2 – координаты двух произвольных точек графика.

5. По экспериментальным данным, записанным в табл. 2, построить график зависимости логарифма сопротивления полупроводника от обратной температуры $\ln R_{\Pi} = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Зависимость должна быть линейной.

6. Из графика зависимости $\ln R_{\Pi} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ определить постоянную температурной чувствительности B и значение R_0 по следующим формулам:

$$B = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}; \quad R_0 = \exp \frac{\frac{1}{T_1} \ln R_2 - \frac{1}{T_2} \ln R_1}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}.$$

7. Рассчитать температурный коэффициент электрического сопротивления при комнатной температуре T_0 по следующей формуле:

$$\alpha_{\Pi} = -\frac{B}{T_0^2}.$$

8. На одном листе построить два следующих графика:

а) по экспериментальным данным, записанным в табл. 2, построить (сплошной линией) график зависимости сопротивления полупроводника от температуры $R_{\Pi} = f(T)$. Зависимость должна быть экспоненциальной;

б) используя полученные в п. 6 значения B и R_0 , рассчитать и построить (пунктирной линией) график зависимости

$$R_{\Pi} = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right).$$

Результатами лабораторной работы являются:

1. Заполненные табл. 1, 2 и 3.

2. Графическое представление данных:

а) $R_{\Pi} = f(T)$;

б) $\ln R_{\Pi} = f\left(\frac{1}{T}\right)$;

в) $R_{\Pi} = f(T)$ (экспериментальные и рассчитанные данные).

3. Температурный коэффициент электрического сопротивления металла.

4. Температурный коэффициент электрического сопротивления полупроводника.

Правила оформления протокола и отчета по лабораторной работе приведены в прил. 1.

Правила построения графиков приведены в прил. 2.

Правила обработки графиков приведены в прил. 3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем определяется электропроводность металла и полупроводника?
Литература: [1, п. 8.4]; [2, § 55] [3, п. 7.5].
2. Как зависит концентрация и подвижность свободных носителей заряда в металлах и полупроводниках от температуры?
Литература: [1, п. 8.6]; [2, § 57], [3, п. 7.3].
3. Основные положения классической и квантовой статистики?
Литература: [1, гл. 6-7]; [2, гл. VI-VII], [3, гл. 6].
4. Что такое уровень (энергия) Ферми?
Литература: [1, п. 8.1]; [2, § 51]; [3, п. 6.8].
5. Как вычислить энергию Ферми?
Литература: [1, п. 8.1]; [2, § 51]; [3, п. 6.8].
6. Что такое полупроводники с точки зрения зонной теории?
Литература: [1, п. 8.2]; [2, § 53]; [3, п. 7.3].
7. Как определяется ширина запрещенной зоны полупроводника?
Литература: [1, п. 8.2]; [2, § 53]; [3, п. 7.3].
8. Характер заполнения и расположение энергетических зон в металлах, полуметаллах, полупроводниках и диэлектриках.
Литература: [1, п. 8.2]; [2, § 53]; [3, п. 7.3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Учеб. пособие. В 5-и тт. Т. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 10-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 384 с. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/708>.

2. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3 т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 10-е изд., стер. – СПб.:

Лань, 2011. – 320 с. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2040>.

3. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 4. Квантовая физика. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. – 375 с.

4. **Гуртов В.А., Осауленко Р.Н.** Физика твердого тела для инженеров: учеб. Пособие. Издание 2-е, доп. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с. Электронный ресурс: <http://dssp.petrus.ru/p/tutorial/ft/>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № ФТТ-2

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ (ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНИК)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Получить экспериментальную зависимость разности температур на спаях полупроводниковой термобатареи от силы постоянного тока, протекающего через термоэлемент.

2. Определить холодильный коэффициент исследованной термобатареи.

ВВЕДЕНИЕ

В 1834 г. Пельтье, проводя опыты со спаями висмута и меди, обнаружил, что при пропускании постоянного электрического тока через цепь, составленную из разнородных металлов или полупроводников, один из контактов нагревается, а другой охлаждается (рис. 1).

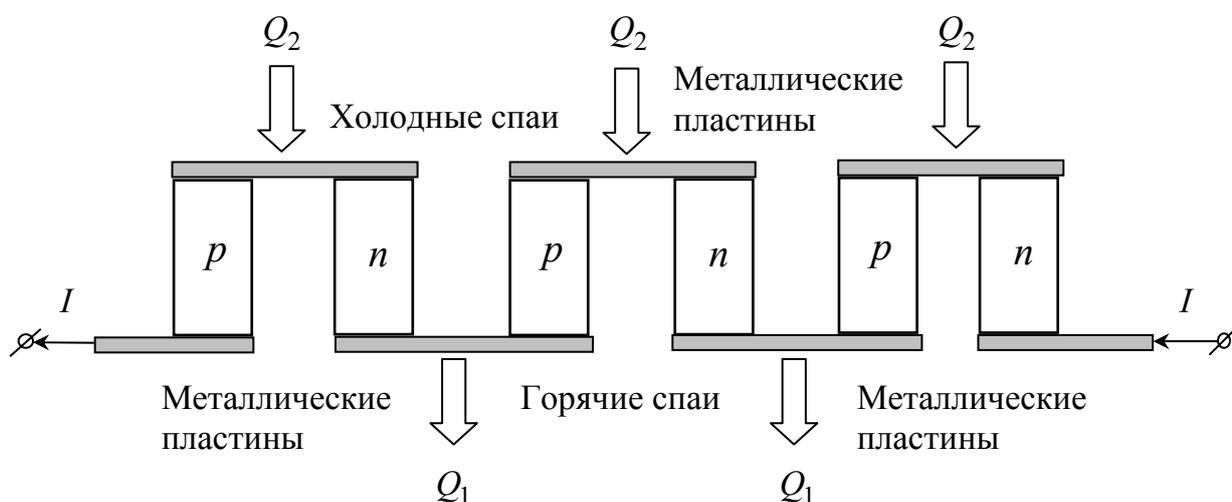


Рис. 1. Принципиальная схема установки для наблюдения явления Пельтье

Явление Пельтье используется в термоэлектрических холодильниках, термоэлементы которых обычно состояются из дырочного p -полупроводника и электронного n -полупроводника, соединенных металлическими пластинками (см. рис. 1).

Термоэлектрические холодильники находят в настоящее время применение в холодильной технике, в устройствах охлаждения электронных элементов.

Эффект Пельтье в термоэлементе из полупроводников можно объяснить следующим образом. Основными носителями тока в полупроводниках p -типа являются дырки, а в полупроводниках n -типа и металле – электроны. Дырки движутся в направлении тока I , а электроны – ему навстречу. В тех областях контакта p -полупроводника с n -полупроводником, в которых дырки встречаются с электронами (нижние спаи на рис. 1), они рекомбинируют: электрон проводимости n -полупроводника, попав в p -полупроводник, занимает вакантное место в валентной связи. При этом высвобождается энергия, которая требуется для образования свободного электрона в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике, а также кинетическая энергия электрона и дырки. Эта энергия сообщается кристаллической решетке и идет на нагревание области контакта.

В тех областях контакта n -полупроводника с p -полупроводником, в которых протекающий ток отсасывает электроны и дырки от границы между полупроводниками (верхние спаи на рис. 1), убыль свободных носителей заряда в пограничной области восполняется за счет рождения новой пары свободных носителей заряда – электрон и дырка. На образование свободных носителей заряда затрачивается энергия, заимствованная у решетки, и область контакта охлаждается.

Опытным путем установлено, что количество выделившейся или поглотившейся в области контакта теплоты в единицу времени пропорционально проходящему через спай току. Следует заметить, что в отличие от теплоты Джоуля–Ленца теплота Пельтье пропорциональна не квадрату, а первой степени силы тока.

Количество выделившейся или поглотившейся в области контакта теплоты зависит также от природы контактирующих веществ и от температуры.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Описание стенда

Работа выполняется на лабораторном стенде, в состав которого входят: блок питания и управления (стоит у стены), блок исследуемых образцов (лежит на столе). Общий вид лабораторного стенда показан на рис. 2.

Термоэлектрический элемент расположен в блоке исследуемых образцов и закрыт прозрачной цилиндрической крышкой.

Своими горячими спаями термоэлектрический элемент прижат к массивной металлической плите, которая является радиатором, поэтому в условиях проводимого опыта можно считать температуру горячих спаев равной температуре окружающей среды ($T_1 = T_0$).

Разность температур между холодными и горячими спаями измеряется термопарой, подключенной к стрелочному измерительному прибору в блоке питания и управления (стоит у стены).

Питание полупроводникового термоэлектрического элемента осуществляется от источника регулируемого по величине постоянного тока. Этот источник расположен в блоке питания и управления (стоит у стены).

Амперметр для измерения тока через термоэлектрический элемент имеет предел измерений 2 А.

Подготовка стенда к работе

1. Проверить, чтобы на торцевой (задней) стороне блока исследуемых образцов кабель был включен во второй разъем слева.
2. Плавно повернуть ручку «Регулятор тока» против часовой стрелки до упора.
3. Включить блок питания и управления с помощью тумблера «Сеть» (при этом должны загореться индикаторная лампа и надпись НАГРЕВ).

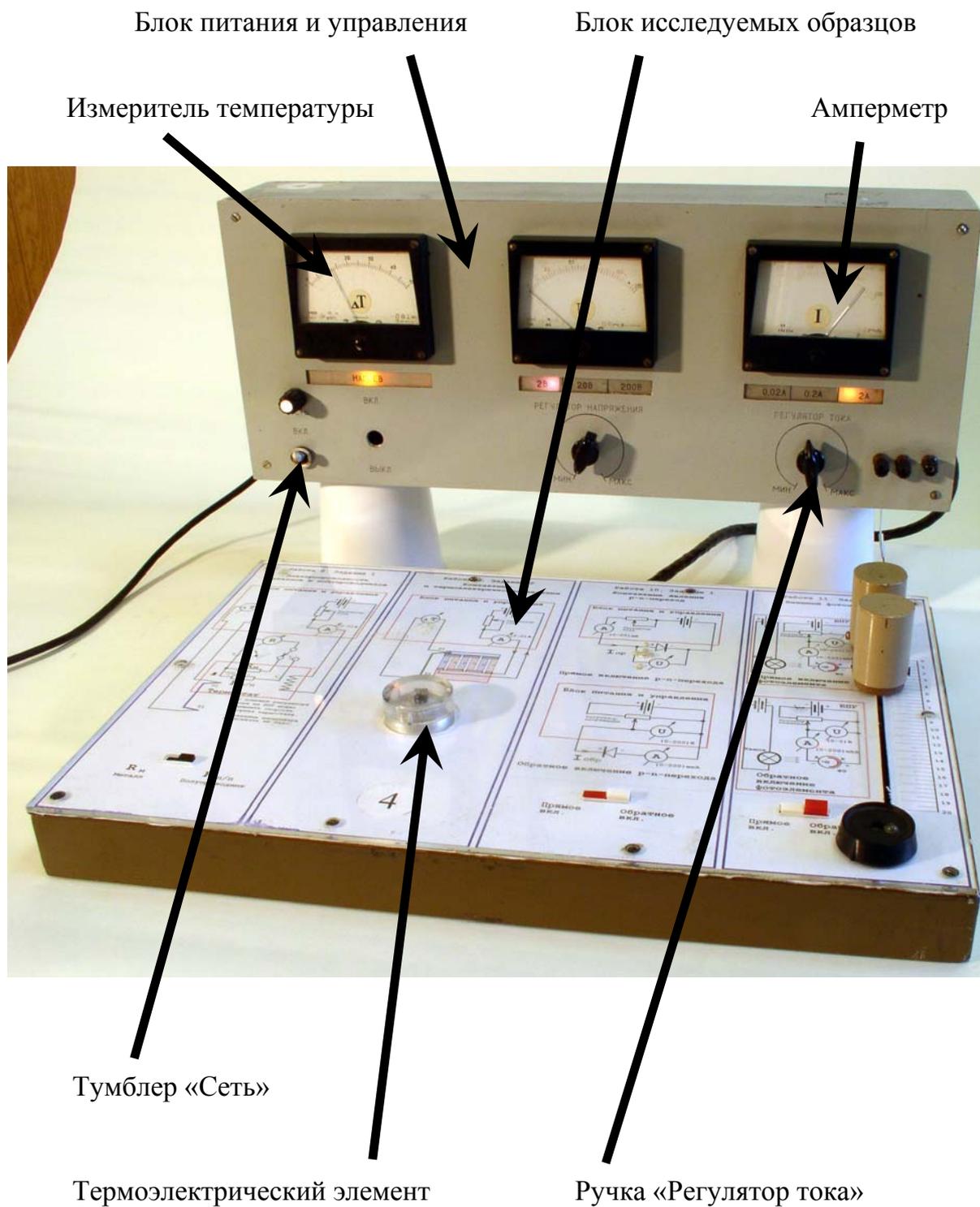


Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда

Выполнение измерений

1. Заполнить таблицу средств измерения (табл. 1).

Таблица 1

Средства измерения

Средство измерения	Предел измерения	Цена деления	Погрешность
Спиртовой термометр			
Электронный термометр			
Амперметр	2 А		

2. По термометру, установленному в лаборатории, измерить температуру воздуха T_0 в лаборатории. Записать измеренную температуру над табл. 2.

3. С помощью ручки «Регулятор тока» установить ток через нагреватель последовательно от 0,1 до 2 А через 0,1 А.

При этом температура верхней поверхности элемента начнет понижаться. При каждом значении тока подождать 1 мин и измерить силу тока и разность температур между холодной и горячей поверхностями.

Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные

$$T_0 = \dots \text{ К}$$

$I, \text{ А}$	$\Delta T, \text{ К}$	$T_2 = T_0 - \Delta T, \text{ К}$
0		
0,1		
0,2		
и т. д. до 2 А		

4. По окончании измерений выключить стенд. Для этого:

– плавно повернуть ручку «Регулятор тока» против часовой стрелки до упора;

– выключить блок питания и управления (стоит у стены) с помощью тумблера «Сеть».

Внимание! Результаты измерений должны быть подписаны преподавателем кафедры физики (в противном случае работа считается невыполненной).

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 2 построить график зависимости $\Delta T = f(I)$. Кривая может иметь максимум.

2. Пользуясь таблицей свойств материалов (табл. 3), рассчитать добротность термоэлемента Z .

Таблица 3

Свойства материалов

Материал	ρ , Ом·м	λ , Вт/(м·К)	α , В/К
$\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (<i>p</i> -тип)	$6,6 \cdot 10^{-6}$	1,4	$16 \cdot 10^{-5}$
$\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (<i>n</i> -тип)	$10 \cdot 10^{-6}$	1,2	$17 \cdot 10^{-5}$

$$Z = \left(\frac{\alpha_p + \alpha_n}{\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n}} \right)^2,$$

где α – коэффициент термоэдс; λ – теплопроводность; ρ – удельное электрическое сопротивление; индексы *p* и *n* относятся к типу полупроводника.

3. Рассчитать следующий коэффициент:

$$\mu = \sqrt{1 + \frac{1}{2} Z (T_1 + T_{2\min})},$$

где T_1 – температура горячих спаев; $T_{2\min}$ – наименьшая температура холодных спаев, достигнутая в опыте.

4. Рассчитать холодильный коэффициент данного термоэлемента

$$\varepsilon = \frac{T_{2\min}}{T_1 - T_{2\min}} \frac{\mu - \frac{T_1}{T_{2\min}}}{\mu + 1}.$$

5. Рассчитать холодильный коэффициент идеальной холодильной машины (т. е. работающей по обратному циклу Карно), работающей в том же диапазоне температур,

$$\varepsilon_K = \frac{T_{2\min}}{T_1 - T_{2\min}}.$$

Результатами лабораторной работы являются:

1. Заполненные табл. 1 и 2.
2. Графическое представление опытных данных.
3. Значение добротности термоэлемента.
4. Значение холодильного коэффициента данного термоэлемента.
5. Значение холодильного коэффициента идеальной холодильной машины.

Правила оформления протокола выполнения и отчета по лабораторной работе приведены в прил. 1.

Правила построения графиков приведены в прил. 2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

9. В чем заключается явление Пельтье и его отличие от явления Зеебека?
Литература: [1, п. 9.4]; [2, § 63]; [3, п. 8.9].
10. Как связаны между собой коэффициенты Пельтье и термоэдс термопары?
Литература: [1, п. 9.4]; [2, § 63]; [3, п. 8.9].
11. Что такое внешняя контактная разность потенциалов и чем она определяется?
Литература: [1, п. 9.3]; [2, § 62]; [3, п. 8.3, 8.4].
12. Как объяснить эффект Пельтье в термобатарее из полупроводников *p*-типа и *n*-типа?
Литература: [1, п. 9.4]; [2, § 63]; [3, п. 8.9].
13. Практическое использование эффекта Пельтье.
Литература: [1, п. 9.4]; [2, § 63]; [3, п. 8.9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Учеб. пособие. В 5-и тт. Т. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 10-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 384 с. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/708>.

2. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3 т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 10-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 320 с. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2040>.

3. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 4. Квантовая физика. Учеб. пособие. 2-е изд. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. – 375 с.

4. **Гуртов В.А., Осауленко Р.Н.** Физика твердого тела для инженеров: учеб. Пособие. Издание 2-е, доп. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с. Электронный ресурс: <http://dssp.petrus.ru/p/tutorial/ftt/>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № ФТТ-3

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ *p-n*-ПЕРЕХОДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Получить экспериментальную вольтамперную характеристику *p-n*-перехода.
2. Определить значение электрического сопротивления *p-n*-перехода при прямом и обратном включении *p-n*-перехода.

ВВЕДЕНИЕ

Электронно-дырочный переход или *p-n*-переход – это область контакта двух веществ с различным типом проводимости: электронной (*n*-тип проводимости) и дырочной (*p*-тип проводимости). Такой переход образуется при контакте полупроводников *p*-типа и *n*-типа, металла и полупроводника *p*-типа, а также внутри одного полупроводника, если одна его часть из-за примесей имеет электронную, а другая – дырочную проводимость. Толщина области *p-n*-перехода обычно составляет от 0,01 до 1 мкм и зависит от концентрации свободных носителей заряда.

Если к *p-n*-переходу подключить внешнее напряжение так, чтобы положительный потенциал был подключен к *p*-области, а отрицательный потенциал – к *n*-области, то такое напряжение называют прямым, протекающий ток – прямым током, а способ подключения – прямым включением.

Если к *p-n*-переходу подключить внешнее напряжение так, чтобы положительный потенциал был подключен к *n*-области, а отрицательный потенциал – к *p*-области, то такое напряжение называют обратным или запирающим, протекающий ток – обратным током, а способ подключения – обратным включением.

Прямой ток *p-n*-перехода на несколько порядков больше обратного.

Зависимость тока через *p-n*-переход от напряжения при прямом и обратном его подключении к источнику постоянного напряжения представляется в виде вольтамперной характеристики (рис. 1). Гра-

фиг занимает первый и третий квадранты координатной сетки. График вольтамперной характеристики имеет излом в начале координат, так как при построении графика обычно применяют разные масштабы для прямой и обратной ветвей характеристики.

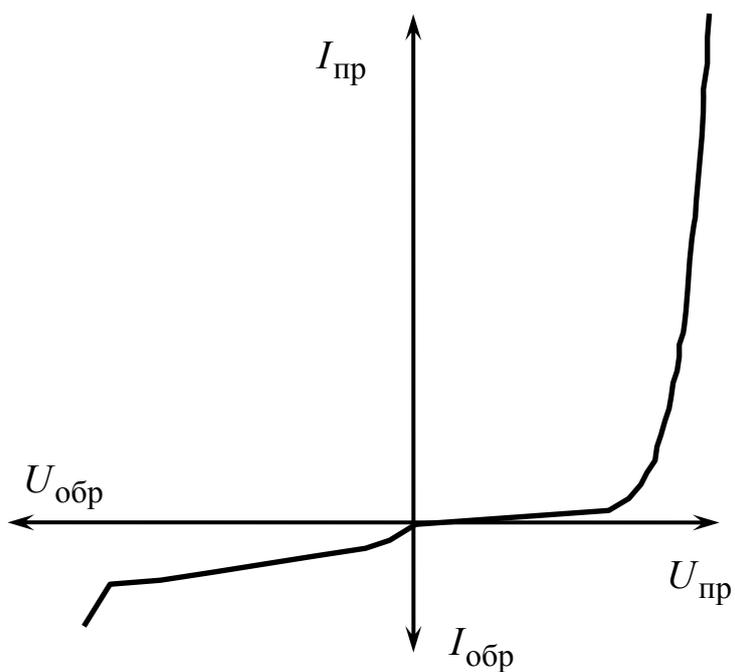


Рис. 1. Вольтамперная характеристика p - n -перехода

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Описание стенда

Работа выполняется на лабораторном стенде, в состав которого входят: блок питания и управления (стоит у стены), блок исследуемых образцов (лежит на столе) и цифровой измерительный прибор. Общий вид лабораторного стенда показан на рис. 2.

Для измерения используются вольтметр и амперметр блока питания и управления и цифровой измерительный прибор – мультиметр.

Для измерения зависимости тока через *p-n*-переход от напряжения при прямом включении *p-n*-перехода используются амперметр блока питания и управления и цифровой мультиметр, включенный в режим измерения постоянного напряжения.

Амперметр имеет предел измерения 20 мА.

Цифровой мультиметр следует переключить на предел измерения постоянного напряжения 2000 мВ (рис. 3).

Для измерения зависимости тока через *p-n*-переход от напряжения при обратном включении *p-n*-перехода используются вольтметр блока питания и управления и цифровой мультиметр, включенный в режим измерения постоянного тока.

Вольтметр имеет предел измерения 200 В.

Цифровой мультиметр следует переключить на предел измерения постоянного тока 200 мкА (рис. 4).

Подготовка стенда к работе

1. Проверить, чтобы на торцевой (задней) стороне блока исследуемых образцов кабель был включен во второй разъем справа.

2. Плавно повернуть ручку «Регулятор тока» против часовой стрелки до упора.

3. Плавно повернуть ручку «Регулятор напряжения» против часовой стрелки до упора.

4. Включить блок питания и управления с помощью тумблера «Сеть».

5. Поворотом ручки включить цифровой мультиметр на предел измерения 2000 мВ (см. рис. 3).

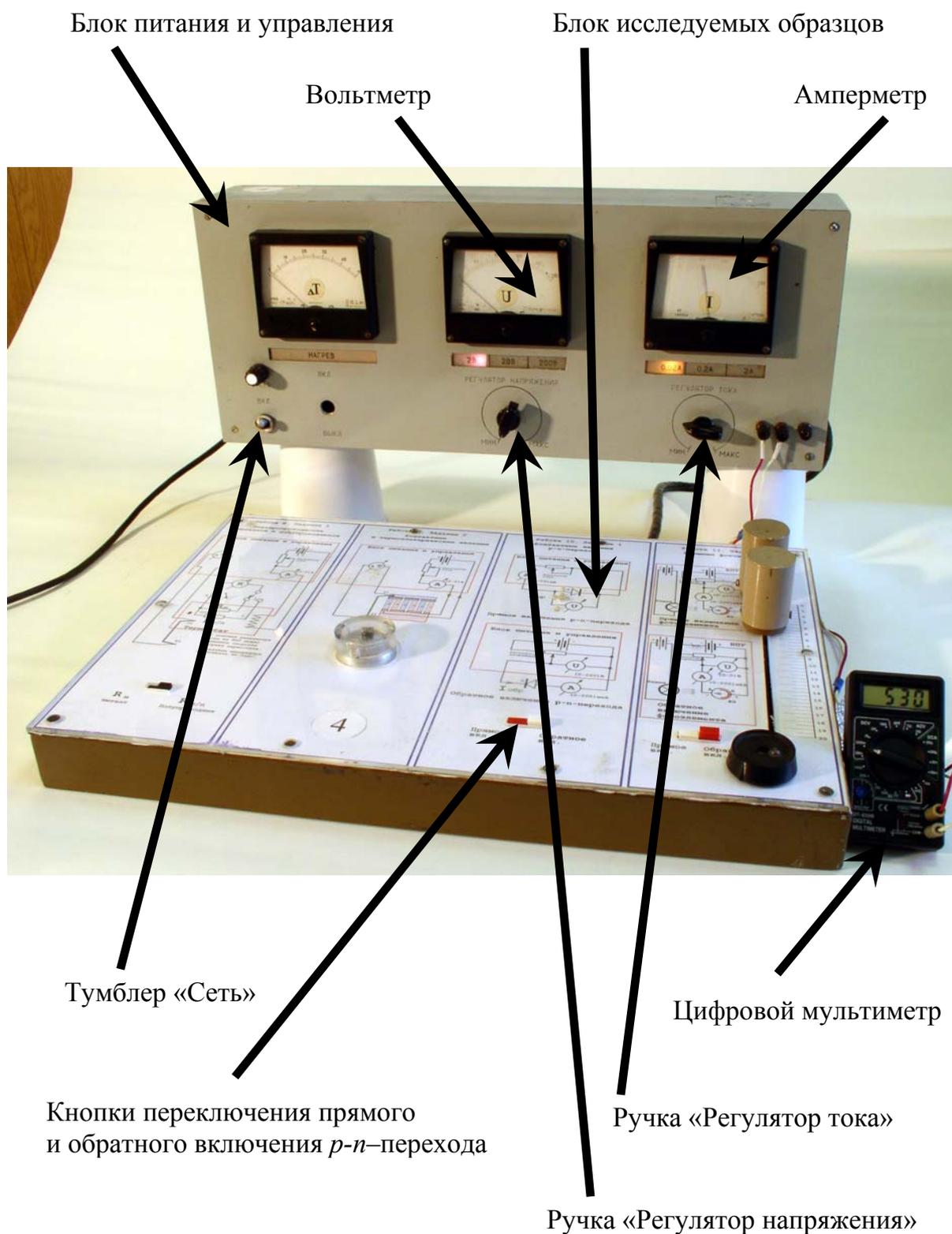


Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда



Рис. 3. Цифровой мультиметр, включенный на предел измерения 2000 мВ



Рис. 4. Цифровой мультиметр, включенный на предел измерения 200 мкА

Выполнение измерений

1. Заполнить таблицу средств измерения (табл. 1).

Таблица 1

Средства измерения

Средство измерения	Предел измерения	Цена деления	Погрешность
Амперметр	20 мА		
Вольтметр	2000 мВ		
Амперметр	200 мкА		
Вольтметр	200 В		

2. Для измерения зависимости тока через p - n -переход от напряжения при прямом включении нажать кнопку «Пр» на блоке исследуемых образцов.

3. Поворотом ручки переключить цифровой мультиметр на предел измерения 2000 мВ (рис. 3).

4. С помощью ручки «Регулятор тока» задавать величину силы тока от 0 до 20 мА с шагом 1 мА. Измерять по стрелочному миллиамперметру значение силы тока через p - n -переход, а по цифровому мультиметру – падение напряжения на p - n -переходе.

Записать результаты измерений в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные

Прямое включение		Обратное включение	
$U_{\text{пр}}$, мВ	$I_{\text{пр}}$, мА	$U_{\text{обр}}$, В	$I_{\text{обр}}$, мкА
	1	-10	
	2	-20	
	3	-30	
	4	-40	
	5	-50	
	6	-60	
	7		
	и т. д. до 20 мА		

5. Плавно повернуть ручку «Регулятор тока» против часовой стрелки до упора.

6. Для измерения зависимости тока через p - n -переход от напряжения при обратном включении нажать кнопку «Обр» на блоке исследуемых образцов.

7. Поворотом ручки переключить цифровой мультиметр на предел измерения 200 мкА (см. рис. 4).

8. С помощью ручки «Регулировка напряжения» задавать величину напряжения от 0 до 60 В с шагом 10 В. Измерять по цифровому мультиметру значение силы тока через p - n -переход, а по стрелочному вольтметру – падение напряжения на p - n -переходе. Записать результаты измерений в табл. 2.

9. Плавно повернуть ручку «Регулятор напряжения» против часовой стрелки до упора.

10. По окончании измерений выключить стенд. Для этого:

– плавно повернуть ручку «Регулятор тока» против часовой стрелки до упора;

– плавно повернуть ручку «Регулятор напряжения» против часовой стрелки до упора;

– выключить блок питания и управления (стоит у стены) с помощью тумблера «Сеть»;

– выключить цифровой мультиметр (переключатель пределов измерения поставить в положение «OFF»).

Внимание! Результаты измерений должны быть подписаны преподавателем кафедры физики (в противном случае работа считается невыполненной).

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 2 на одном графике построить вольтамперную характеристику p - n -перехода при прямом и обратном включении.

2. На прямой ветви вольтамперной характеристики взять 5 точек, равномерно распределив их по кривой, и рассчитать 5 значений электрического сопротивления по следующей формуле:

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}.$$

Рассчитанные значения сопротивлений записать в табл. 3.

Таблица 3

Рассчитанные значения сопротивлений

Прямое включение		Обратное включение	
$U_{\text{пр}}, \text{ мВ}$	$R_{\text{пр}}, \text{ Ом}$	$U_{\text{обр}}, \text{ В}$	$R_{\text{обр}}, \text{ Ом}$

3. На обратной ветви вольтамперной характеристики взять 5 точек, равномерно распределив их по кривой, и рассчитать 5 значений электрического сопротивления по следующей формуле:

$$R_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}}}.$$

Рассчитанные значения сопротивлений записать в табл. 3.

4. Построить график зависимости $R_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$.

5. Построить график зависимости $R_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$.

Результатами лабораторной работы являются:

1. Заполненные табл. 1, 2 и 3.
2. График вольтамперной характеристики p - n -перехода при прямом и обратном включении.
3. График зависимости $R_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$.
4. График зависимости $R_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$.

Правила оформления протокола и отчета по лабораторной работе приведены в прил. 1.

Правила построения графиков приведены в прил. 2.

Правила обработки графиков приведены в прил. 3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

14. Что понимают под полупроводником с точки зрения зонной теории?
Литература: [1, п. 8.2]; [2, § 53]; [3, п. 7.3].
15. Объясните механизм собственной проводимости полупроводников.
Литература: [1, п. 8.6]; [2, § 58]; [3, п. 7.6].
16. Объясните механизм примесной проводимости полупроводников.
Литература: [1, п. 8.6]; [2, § 59]; [3, п. 7.7].
17. Что такое донорная и акцепторная примесь?
Литература: [1, п. 8.6]; [2, § 59]; [3, п. 7.7].
18. Что понимают под p - n -переходом и как он образуется?
Литература: [1, п. 9.5]; [2, § 64]; [3, п. 8.5].
19. Назовите основные и неосновные носители тока в p - и n -областях и объясните, как они образуются?
Литература: [1, п. 9.5]; [2, § 64]; [3, п. 8.5].
20. Что такое обратное и прямое напряжение?
Литература: [1, п. 9.5]; [2, § 64]; [3, п. 8.6, 8.7].
21. Как изменяется потенциальный барьер p - n -перехода при прямом и обратном включении?
Литература: [1, п. 9.5]; [2, § 64]; [3, п. 8.5].
22. Как по вольт-амперной характеристике определить сопротивление p - n -перехода при прямом и обратном включении?
Литература: [1, п. 9.5]; [2, § 64]; [3, п. 8.6, 8.7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Учеб. пособие. В 5-и тт. Т. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 10-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 384 с. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/708>.

2. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3 т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 10-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 320 с. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2040>.

3. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 4. Квантовая физика. Учеб. пособие. 2-е изд. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. – 375 с.

4. **Гуртов В.А., Осауленко Р.Н.** Физика твердого тела для инженеров: учеб. Пособие. Издание 2-е, доп. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с. Электронный ресурс: <http://dssp.petrus.ru/p/tutorial/ftt/>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № ФТТ-4

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Получить экспериментальную вольтамперную характеристику внешнего фотоэффекта.
2. Получить экспериментальную световую характеристику внешнего фотоэффекта.
3. Определить:
 - значение задерживающего напряжения;
 - максимальную скорость фотоэлектронов;
 - работу выхода;
 - интегральную чувствительность фотоэлемента.

ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектрическими явлениями или фотоэффектом называют электрические явления, происходящие в веществе под действием электромагнитного излучения. В твердых и жидких веществах фотоэффект разделяют на внешний и внутренний. В газах фотоэффект называют фотоионизацией.

Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией) называют явление вырывания электронов с поверхности твердых или жидких веществ под действием электромагнитного излучения.

К внутреннему фотоэффекту относятся: изменение электропроводности (фотопроводимость), возникновение электродвижущей силы (вентильный фотоэффект), изменение диэлектрической проницаемости (фотодиэлектрический эффект).

Впервые внешний фотоэффект обнаружил Г. Герц в 1887 г. В 1888–1890 гг. его тщательно исследовал профессор Московского университета А. Г. Столетов, а в 1905 г. теоретически объяснил А. Эйнштейн.

Вольтамперная характеристика (т. е. зависимость тока от напряжения) представлена на рис. 1. Вольтамперная характеристика показывает, что:

- при некотором напряжении фототок достигает насыщения $I_{\text{нас}}$;

- фототок насыщения зависит от светового потока Φ ;
- для прекращения фототока необходимо приложить обратное по знаку напряжение U_3 , которое называют задерживающим напряжением или задерживающим потенциалом.

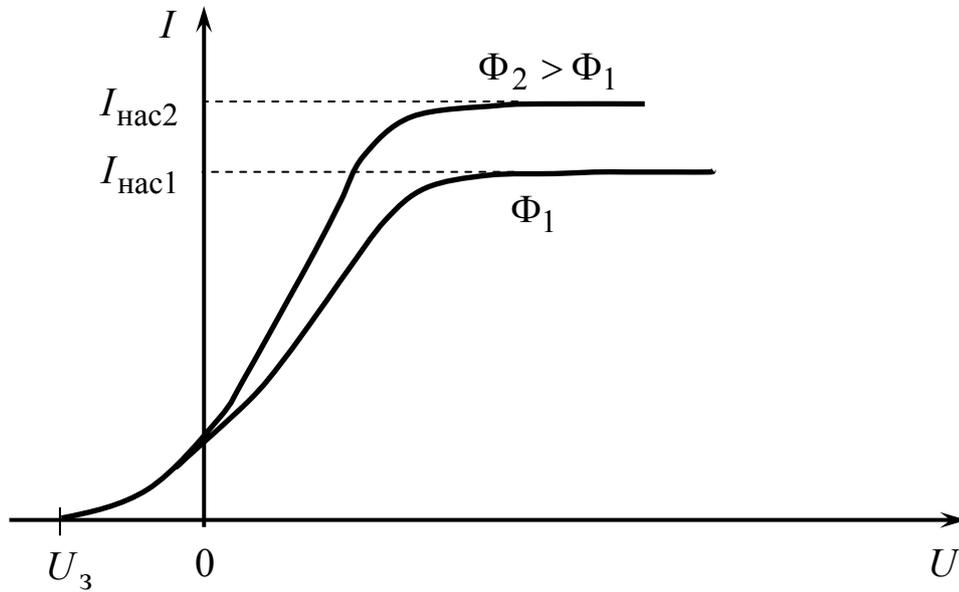


Рис. 1. Вольтамперная характеристика внешнего фотоэффекта

В данной работе изучается вольтамперная характеристика внешнего фотоэффекта для вакуумного фотоэлемента.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Описание стенда

Работа выполняется на лабораторном стенде, в состав которого входят: блок питания и управления (стоит у стены), блок исследуемых образцов (лежит на столе) и цифровой измерительный прибор. Общий вид лабораторного стенда показан на рис. 2.

Для измерений используются вольтметр блока питания и управления и цифровой измерительный прибор – мультиметр.

При измерении зависимости фототока от напряжения в прямом включении фотоэлемента:

- вольтметр имеет предел измерения 200 В;
- цифровой мультиметр следует переключить на предел измерения постоянного тока 200 мкА (рис. 3).

При измерении зависимости фототока от напряжения в обратном включении фотоэлемента:

- вольтметр имеет цену деления 2 В;
- цифровой мультиметр следует переключить на предел измерения постоянного тока 200 мкА (см. рис. 3).

Подготовка стенда к работе

1. Проверить, чтобы на торцевой (задней) стороне блока исследуемых образцов кабель был включен в первый разъем справа.

2. Плавно повернуть ручку «Регулятор напряжения» против часовой стрелки до упора.

3. Включить блок питания и управления с помощью тумблера «Сеть».

4. Поворотом ручки включить цифровой мультиметр на предел измерения 200 мкА (см. рис. 3).

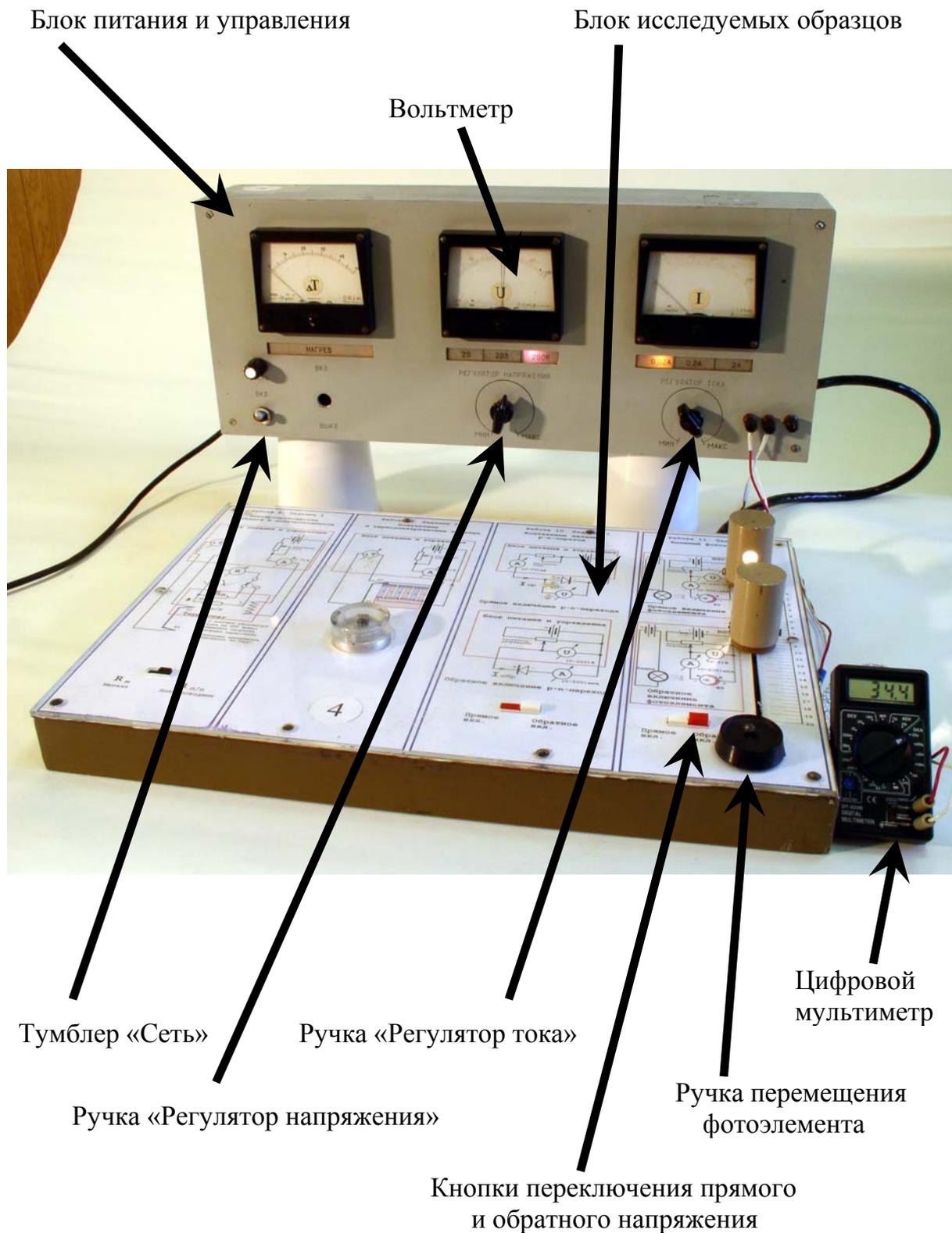


Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда



Рис. 3. Цифровой мультиметр, включенный на предел измерения 200 мкА

Выполнение измерений

1. Заполнить таблицу средств измерения (табл. 1).

Таблица 1

Средства измерения

Средство измерения	Предел измерения	Цена деления	Погрешность
Амперметр	200 мкА	1 мкА	2 мкА
Вольтметр	2000 мВ	50 мВ	0,5 %
Вольтметр	200 В	5 В	0,5 %

2. С помощью ручки перемещения фотоэлемента, расположенной справа в нижней части блока исследуемых образцов, установить фотоэлемент на расстоянии $\ell = 7$ см от лампы (ℓ – расстояние между центрами цилиндров).

3. Для измерения зависимости фототока от напряжения при прямом включении нажать кнопку «Пр» на блоке исследуемых образцов.

4. С помощью ручки «Регулятор напряжения» задавать величину напряжения от 0 до 160 В с шагом 10 В и измерять значения силы тока фотоэлемента и напряжение. Записать результаты измерений в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения

Прямое включение		Обратное включение	
$\ell = 7$ см		$\ell = 7$ см	
U , В	I , мкА	U , В	I , мкА
0		0	
10		-0,1	
20		-0,2	
30		-0,3	
и т. д. до 160 В		-0,4	
		-0,5	
		-0,6	

5. Для измерения зависимости фототока от напряжения при обратном включении нажать кнопку «Обр» на блоке исследуемых образцов.

6. С помощью ручки «Регулятор напряжения» задавать величину напряжения от 0 с шагом 0,1 В до тех пор, пока цифровой амперметр не покажет значение силы тока, равное нулю. Измерять значения силы тока фотоэлемента и напряжение и записывать результаты измерений в табл. 2.

7. С помощью ручки перемещения фотоэлемента, расположенной справа в нижней части блока исследуемых образцов, установить фотоэлемент на расстоянии $\ell = 10$ см от лампы (ℓ – расстояние между центрами цилиндров).

8. Провести измерения зависимости фототока от напряжения при прямом и обратном включении, выполняя пп. 2–5. Записать результаты измерений в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерения

Прямое включение		Обратное включение	
$\ell = 10$ см		$\ell = 10$ см	
U , В	I , мкА	U , В	I , мкА
0		0	
10		-0,1	
20		-0,2	
30		-0,3	
и т. д. до 160 В		-0,4	
		-0,5	
		-0,6	

9. Для измерения световой характеристики фотоэлемента при прямом включении нажать кнопку «Пр» на блоке исследуемых образцов.

10. С помощью ручки «Регулятор напряжения» установить величину напряжения 160 В. (Эта величина напряжения гарантирует установление фототока насыщения в вакуумном фотоэлементе.)

11. С помощью ручки перемещения фотоэлемента, расположенной справа в нижней части блока исследуемых образцов, установить поочередно фотоэлемент на расстояния ℓ от 7 до 19 см от лампы (ℓ – расстояние между центрами цилиндров), измерить значения силы фототока насыщения. Записать результаты измерений в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерения

$U = 180 \text{ В,}$	$d = 1,2 \text{ см,}$	$P = 15 \text{ Вт}$
$\ell, \text{ см}$	$I_{\text{нас}}, \text{ мкА}$	$\Phi, \text{ лм}$
7		
8		
9		
и т. д. до 19 см		

12. По окончании измерений выключить стенд. Для этого:

- плавно повернуть ручку «Регулятор напряжения» против часовой стрелки до упора;
- выключить блок питания и управления с помощью тумблера «Сеть»;
- выключить цифровой мультиметр (переключатель пределов измерения поставить в положение «OFF»).

Внимание! Результаты измерений должны быть подписаны преподавателем кафедры физики (в противном случае работа считается невыполненной).

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 2 и 3 построить график зависимости фототока от напряжения (вольтамперную характеристику) фотоэлемента при прямом и обратном включении для двух значений светового потока.

2. По графику вольтамперной характеристики определить среднее значение задерживающего напряжения U_3 .

3. Рассчитать максимальную кинетическую энергию и максимальную скорость фотоэлектронов по следующим формулам:

$$E_{\text{кин}}^{\text{max}} = eU_3,$$

где e – заряд электрона, $e = -1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл; U_3 – значение задерживающего напряжения (отрицательное значение);

$$V_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 E_{\text{кин}}^{\text{max}}}{m_0}},$$

где m_0 – масса покоя электрона, $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.

4. Рассчитать работу выхода электронов из катода фотоэлемента по формуле

$$A = \frac{hc}{\lambda} - eU_3,$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; c – скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; λ – длина волны падающего излучения, для расчетов принять $\lambda = 633$ нм; e – заряд электрона; U_3 – значение задерживающего напряжения (отрицательное значение).

5. Рассчитать световой поток по приближенной формуле

$$\Phi = Pk \left(\frac{d}{\ell} \right)^2,$$

где P – мощность лампы, $P = 15$ Вт; k – коэффициент световой отдачи, $k = 6$ лм/Вт; d – диаметр отверстия в кожухе фотоэлемента, $d = 12$ мм; ℓ – расстояние от нити накаливания лампы до катода фотоэлемента (ℓ – расстояние между центрами цилиндров).

Результаты расчетов записать в табл. 4.

6. По данным табл. 4 построить график зависимости фототока насыщения фотоэлемента от светового потока (световую характеристику). Зависимость должна быть линейной в соответствии с законом Столетова.

7. По графику световой характеристики определить интегральную чувствительность фотоэлемента по формуле

$$K_{\Phi} = \frac{\Delta I_{\text{нас}}}{\Delta \Phi}.$$

Результатами лабораторной работы являются:

1. Заполненные таблицы.
2. Графическое представление опытных данных:
 - а) вольтамперная характеристика фотоэлемента при прямом и обратном включении для двух значений светового потока;
 - б) световая характеристика фотоэлемента.
3. Значение задерживающего напряжения.
4. Рассчитанное значение максимальной кинетической энергии фотоэлектронов в электронвольтах.
5. Рассчитанное значение максимальной скорости фотоэлектронов.
6. Рассчитанное значение работы выхода электронов из катода фотоэлемента в электронвольтах.
7. Рассчитанное значение интегральной чувствительности фотоэлемента.

Правила оформления протокола и отчета по лабораторной работе приведены в прил. 1.

Правила построения графиков приведены в прил. 2.

Правила обработки графиков приведены в прил. 3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

23. Что такое внешний фотоэффект?

Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 9]; [3, п. 2.1, 2.2].

24. Назовите основные законы внешнего фотоэффекта.

Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 9]; [3, п. 2.1, 2.2].

25. Что понимают под работой выхода электронов из кристалла и от чего она зависит?
Литература: [1, п. 9.1]; [2, § 60]; [3, п. 8.1].
26. Объясните основное уравнение внешнего фотоэффекта?
Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 9]; [3, п. 2.1, 2.2].
27. Что такое задерживающее напряжение и от чего оно зависит?
Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 9]; [3, п. 2.1, 2.2].
28. Каким образом можно экспериментально определить работу выхода электронов?
Литература: [1, п. 9.1]; [2, § 60]; [3, п. 8.1].
29. Чем определяется максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов?
Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 9]; [3, п. 2.1, 2.2].
30. Чем определяется красная граница фотоэффекта и какие материалы для катода должны использоваться, чтобы фотоэффект возникал под действием видимого света?
Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 9]; [3, п. 2.1, 2.2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Учеб. пособие. В 5-и тт. Т. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 10-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 384 с. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/708>.
2. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3 т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 10-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 320 с. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2040>.
3. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 4. Квантовая физика. Учеб. пособие. 2-е изд. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. – 375 с.

ОФОРМЛЕНИЕ ПРОТОКОЛА И ОТЧЕТА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Протокол проведения лабораторной работы оформляется на двойном листе из тетради в клетку.

1-я страница

РАБОЧИЙ ПРОТОКОЛ И ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № (название работы) Номер варианта задания Группа Студент Фамилия И.О. Преподаватель Фамилия И.О

2-я и 3-я страницы

Цель работы:	Таблицы с экспериментальными данными
Рисунок:	
Расчетные формулы:	
	Расчеты (начало):

4-я страница

Расчеты (продолжение):
Результаты работы:

ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

Графики необходимы для наглядного представления экспериментальных и расчетных данных.

Графики должны легко читаться и быть понятными. Заголовки, поясняющие надписи, числовые значения рекомендуется выполнять шрифтом высотой не менее 4 мм. Графики выполняют карандашом на бумаге с координатной миллиметровой сеткой (миллиметровая бумага) форматом не менее чем А5. Готовые графики вкладываются в отчет по лабораторной работе.

Координатная сетка

В простейшей двумерной прямоугольной системе координат независимую переменную (аргумент функции) принято откладывать на горизонтальной оси (оси абсцисс), а зависимую переменную (функцию) – на вертикальной оси (оси ординат).

На координатных осях должны быть указаны: обозначения откладываемых величин, единицы их измерения, шкала числовых значений величин.

Оси координат могут быть со шкалами и без шкал. В обоих случаях оси координат рекомендуется заканчивать стрелками. Оси координат, следует выполнять сплошной линией толщиной 0,8 до 1,0 мм.

Масштабы

Масштаб изображения может быть как линейным, так и нелинейным (например, логарифмическим).

Масштаб изображения может быть разным для каждой оси, например: по одной оси 1; 2; 3; 4; 5; ..., а по другой – 5; 10; 15; 20; или по одной оси линейный, а по другой – логарифмический. В некоторых случаях масштабы положительного и отрицательного направлений оси могут быть разными.

Масштаб выбирают таким образом, чтобы:

- а)** график занимал максимально возможную площадь чертежа;
- б)** линия графика была равномерно растянута вдоль обеих осей (если график представляет собой прямую, то рекомендуется, чтобы угол ее наклона к осям не сильно отличался от $\pm 45^\circ$);

в) координаты любой точки можно было определить легко и быстро по шкалам на осях.

Масштаб является удобным для чтения графика, если в одном сантиметре содержится одна единица величины (или две, пять, десять, двадцать, пятьдесят и т. д.). Примеры шкал: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; ..., или 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,10, ..., или 1; 2; 3; 4; 5; ..., или 2; 4; 6; 8; 10, ..., или 5; 10; 15; 20; ...

Масштаб, при котором чтение графика затруднено, считается неприемлемым.

Следует избегать неудобного, (к сожалению, нередко используемого начинающими обучение студентами) масштаба: три сантиметра на единицу величины или в одном сантиметре три единицы (например, 1; 3; 6; 9; ...). Такой неудачный выбор привёл бы к крайне неудобному чтению координат точек на оси.

Шкалы

Шкалы имеют основные и промежуточные деления. На миллиметровой бумаге основные деления должны совпадать с толстыми линиями.

Основные деления снабжают числами. Частоту нанесения числовых значений делений шкал следует выбирать с учетом удобства определения координат. Числа у шкал следует размещать вне поля графика и располагать горизонтально, наносить равномерно по всей оси и без пропусков.

Начало координат, если это не оговорено особо, может не совпадать с нулевыми значениями шкалы. Его выбирают таким образом, чтобы график занимал максимально возможную площадь чертежа.

Обозначение величин Нанесение единиц измерения

Обозначения величин следует размещать в конце шкалы вместе с единицей измерения через запятую, например: p , Па; T , К; t , °С; h , м.

Множитель 10^n (n – целое число) предпочтительно располагается рядом с единицей измерения, например: p , 10^6 Па; или p , МПа; h , 10^{-3} м; или h , мм.

Изображение точек

Точки на графике, полученные путем измерений или расчетов должны изображаться четко и крупно: в виде крестиков треугольников, ромбиков и т. п. (размер символа должен быть в 2–3 раза больше толщины линии). Рекомендуется использовать следующие символы: \times , $+$, Δ , \blacktriangle , \diamond , \blacklozenge , \square , \blacksquare , \circ , \bullet и т.п. Если на одном графике построено несколько зависимостей, то для разных зависимостей следует использовать различные символы.

При построении теоретической линии на графике не показывают точки, через которые проводят линию.

Координаты точек, полученных путем измерений или расчетов, на осях не указывают. Пунктирные линии, определяющие координаты таких точек, не проводят.

Линии

Линия графика должна быть плавной. При выборе формы усредняющей кривой для каждого графика следует руководствоваться следующими правилами. Если известно теоретическое уравнение, описывающее эту зависимость, то нужно построить кривую, соответствующую этому уравнению. Если теоретическое уравнение неизвестно, то проводят наиболее простую и плавную линию (прямую или кривую), проходящую через массив экспериментальных точек, усредняя их разброс.

Линию следует проводить так, чтобы количество точек по обе стороны от нее было приблизительно одинаковым и как можно ближе к точкам, но, не обязательно пересекая их. Не следует соединять точки ломаной линией.

При проведении линии следует заранее выяснить: должна ли она, согласно теории, проходить через какую-либо конкретную точку, например через начало координат $(0; 0)$.

Пример. Пусть требуется построить график зависимости пути S от времени t при равномерном движении тела. Экспериментальные данные приведены в табл. П.1.

Таблица П.1

t, c	10	12	14	15	16	18	19	22
--------	----	----	----	----	----	----	----	----

$S, \text{ м}$	20	23	30	31	34	34	38	43
----------------	----	----	----	----	----	----	----	----

На рис. П.1 показан график $S(t)$ с наиболее типичными ошибками.

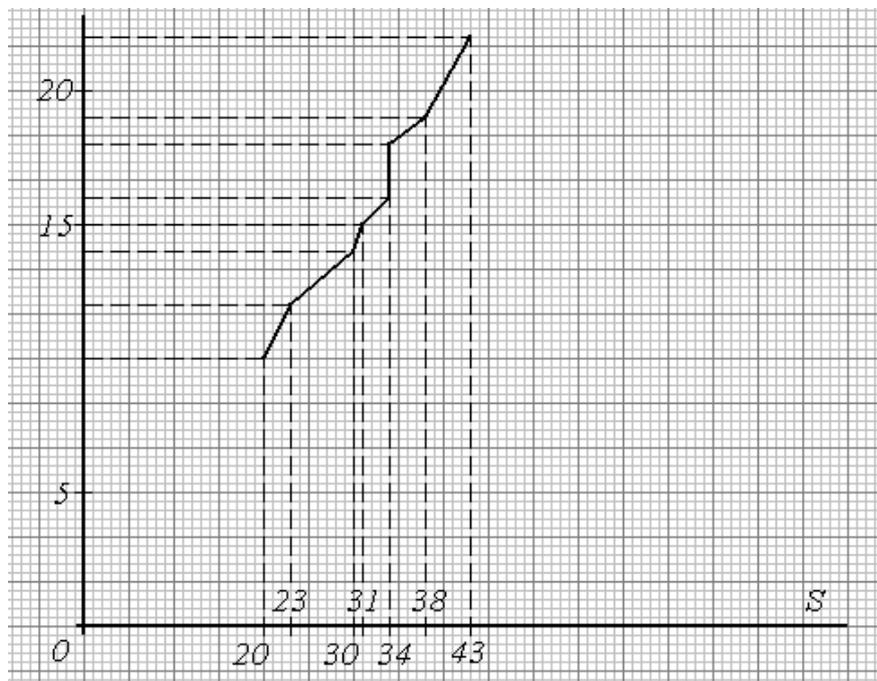


Рис. П.1

При построении графика сделаны следующие ошибки:

- неправильно выбраны направления осей координат. Время t является независимой переменной (аргументом) и должно быть отложено по оси абсцисс (горизонтальной), а путь S является зависимой переменной (функцией) и должен быть отложен по оси ординат (вертикальной);

- на оси ординат не указана отложенная величина (время t) и единицы ее измерения (с);

- на оси абсцисс не указана единица измерения пути S , м;

- некоторые числовые значения шкалы расположены на поле графика;

- масштабные деления на оси времени нанесены неравномерно. Если есть деления 0 и 5, то следующим должно быть 10 и т. д.;

- площадь чертежа использована не полностью. Поскольку из условия примера не следует, что оси координат должны начинаться с

нулевых значений, то начало координат можно сместить и за счет этого увеличить масштаб графика;

- график сжат по оси абсцисс из-за двух ошибок: неправильно выбранного начала координат и неудачного (слишком мелкого) масштаба;

- выбран крайне неудобный масштаб по оси времени, поэтому чтение графика затруднено;

- не выделены символами экспериментальные точки;

- на оси пути нет масштабных делений;

- на оси пути нанесены координаты экспериментальных точек;

- проведены лишние пунктирные линии;

- неправильно соединены экспериментальные точки: зависимость пути от времени при равномерном движении заведомо линейна, и график должен представлять собой прямую линию, а не ломаную.

Правильно оформленный график представлен на рис. П.2.

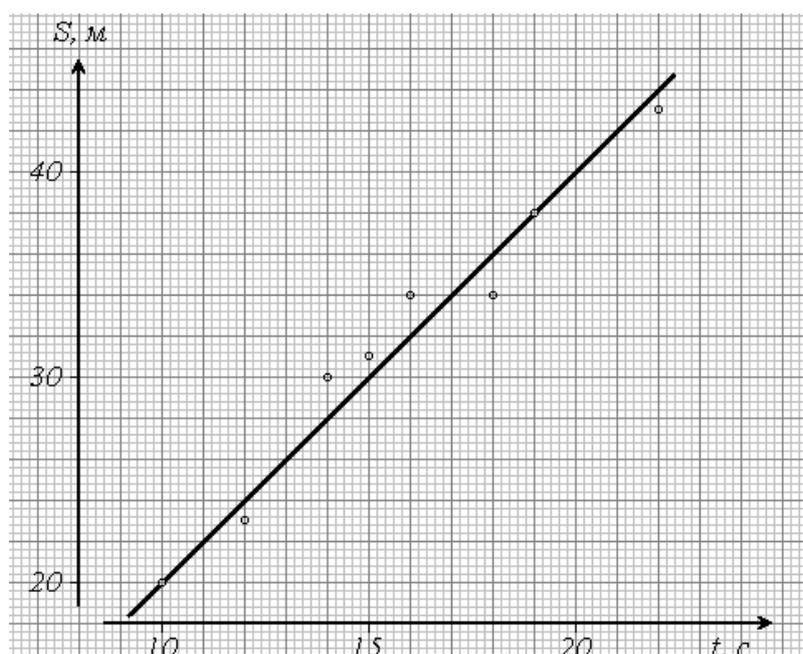


Рис. П.2

Допускается выполнение графиков с помощью компьютерных программ (например, Excel), но и в этом случае графики должны соответствовать всем изложенным здесь требованиям (в частности, иметь мелкую координатную, например, миллиметровую сетку). Чтобы мелкая сетка не мешала восприятию экспериментальных точек на

графике и точному определению их координат, сетку можно задать в виде тонких штриховых линий в серых полутонах, соответствующих промежуточным делениям шкалы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАКЛОНА ПРЯМОЙ НА ГРАФИКЕ

Во многих случаях необходимо определить по графику наклон прямой, который равен коэффициенту a в уравнении линейной зависимости

$$y = ax + b.$$

Для этого нужно выбрать две точки на прямой, отстоящие достаточно далеко друг от друга и определить их координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Тогда коэффициент a вычисляется по формуле:

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

Пример. На рисунке П.3 изображена зависимость пройденного пути от времени.

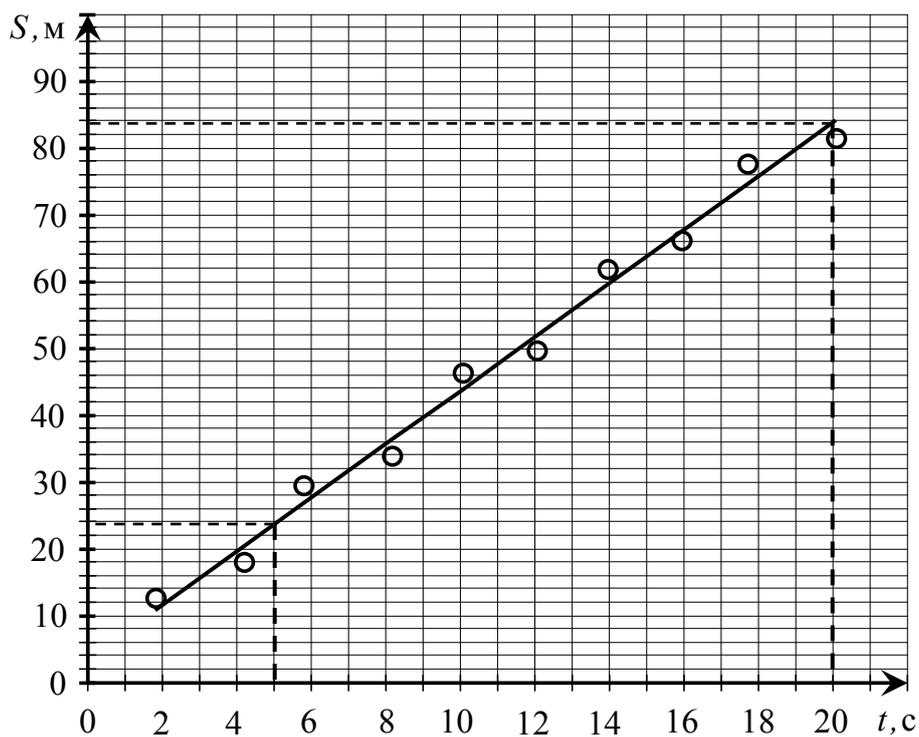


Рис. П.3

Наклон прямой на этом графике получается так:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = \frac{83,3 - 25,4}{20 - 5} = \frac{57,9}{15} \approx 3,86 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Выбирать точки на прямой удобнее всего так, чтобы знаменатель (разность $x_2 - x_1$) принимал значение, позволяющее результат деления легко вычислить устно, чтобы избежать возможной ошибки расчёта.

Например, на рисунке П.3 можно было бы выбрать вторую точку $t_2 = 15$ с вместо $t_2 = 20$ с. Она находится еще достаточно далеко от первой точки, но знаменатель дроби будет равен 10 с, и это существенно облегчает деление.

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = \frac{64,0 - 25,4}{15 - 5} = \frac{38,6}{10} \approx 3,86 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Всякое число состоит из цифр, определяющих количество единиц в различных разрядах числа. Например, в числе 1726,34 имеется шесть цифр. Число содержит 1 тысячу, 7 сотен, 2 десятка, 6 единиц, 3 десятых, 4 сотых. Старший разряд в числе – тысячи (1 тысяча), младший – сотые (4 сотых).

Цифры в числе могут быть значащими и незначащими. *Значащими цифрами числа являются все цифры данного числа, кроме нулей, стоящих слева.* Нули, стоящие в середине или в конце числа (справа) являются значащими цифрами, так как обозначают отсутствие единиц в соответствующем разряде. При этом цифры множителя 10^n не учитываются. Примеры определения количества значащих цифр в числах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры определения количества значащих цифр

Число	Количество значащих цифр
12	2
12,0	3
12,4	3
120	3
124	3
$1,24 \cdot 10^{-3}$	3
0,1240	4
0,1046	4
$0,526 \cdot 10^6$	3
$0,206 \cdot 10^{-3}$	3
$0,200 \cdot 10^{-3}$	3
$0,020 \cdot 10^{-3}$	2

В процессе измерений получают значение величины \bar{x} , его абсолютную Δ_x и относительную ε_x погрешности. Математический анализ показывает, что изложенные в данном пособии методы обработки результатов дают значение погрешности с ошибкой 30 %. Поэтому, чтобы не создавать ложного впечатления о точности прове-

денных измерений, в погрешностях Δ_x и ϵ_x следует ограничивать число значащих цифр.

Погрешности измерения должны содержать не более двух (т. е. одну или две) значащих цифр. Для этого надо использовать следующие правила и порядок ограничения числа значащих цифр.

1. Если первая значащая цифра в абсолютной погрешности Δ_x **1, 2, 3**, то в погрешности оставляем две значащие цифры. Если первая значащая цифра в погрешности **4, 5, 6, 7, 8, 9**, то в погрешности оставляем одну значащую цифру (табл. 2).

2. Измеренное значение \bar{x} должно заканчиваться тем же младшим разрядом, что и абсолютная погрешность Δ_x . Например, если в абсолютной погрешности Δ_x оставлен младший разряд – единицы, то и в измеренном значении должен быть оставлен младший разряд – единицы (табл. 3).

3. В относительной погрешности число значащих цифр ограничиваем по тем же правилам, что и в абсолютной погрешности (см. табл. 2).

При ограничении числа значащих цифр используем операцию округления. Округление числа представляет собой отбрасывание значащих цифр справа после определенного разряда с возможным изменением цифры этого разряда.

Существуют следующие правила округления.

1. Если первая из отбрасываемых цифр меньше чем **5**, то цифра предыдущего разряда не изменяется.

2. Если первая из отбрасываемых цифр больше чем **5**, то цифра предыдущего разряда увеличивается на единицу.

3. Если отбрасываются несколько цифр и первая из отбрасываемых цифр **5**, то цифра предыдущего разряда увеличивается на единицу.

4. Если отбрасывается только одна цифра **5**, а за ней нет цифр, то округление производится до ближайшего четного числа, т. е. цифра предыдущего разряда остается неизменной, если она четная, и увеличивается на единицу, если она нечетная.

5. Округление следует выполнять сразу до желаемого числа значащих цифр, а не по этапам, что может привести к ошибкам.

Примеры ограничения числа значащих цифр в погрешности и в измеренном значении представлены в табл. 2 и 3.

**Примеры ограничения числа значащих цифр
и округления погрешности**

Пример	Пояснения
$0,154 \approx 0,15$ $1,967 \approx 2,0$ $19,37 \approx 19$ $144,1 \approx 0,14 \cdot 10^3$	Первая значащая цифра погрешности 1 , поэтому оставляем две значащие цифры. Замечание. При необходимости число записывают с множителем 10^n , где n – показатель степени.
$0,394 \approx 0,39$ $3,94 \approx 3,9$	Первая значащая цифра погрешности 3 , поэтому оставляем две значащие цифры.
$0,397 \approx 0,4$ $3,97 \approx 4$	Первая значащая цифра погрешности 3 , поэтому оставляем две значащие цифры, но так как при округлении цифра 3 превращается в цифру 4 , то оставляем только одну значащую цифру.
$0,461 \approx 0,5$ $4,78 \approx 5$ $41,1 \approx 4 \cdot 10$ $4123 \approx 4 \cdot 10^3$	Первая значащая цифра погрешности 4 , поэтому оставляем одну значащую цифру.
$0,917 \approx 0,9$ $9,17 \approx 9$ $91,7 \approx 9 \cdot 10$ $9123 \approx 9 \cdot 10^3$	Первая значащая цифра погрешности 9 , поэтому оставляем одну значащую цифру.
$0,0977 \approx 0,10$ $0,956 \approx 1,0$ $956 \approx 1,0 \cdot 10^3$	Первая значащая цифра погрешности 9 , поэтому оставляем одну значащую цифру, но так как при округлении цифра 9 превращается в число 10 , т. е. первая значащая цифра 1 , то оставляем две значащие цифры.
$2,45 \approx 2,4$ $2,35 \approx 2,4$	Первая значащая цифра погрешности 2 , поэтому оставляем две значащие цифры. Отбрасывается только одна цифра 5 , а за ней нет значащих цифр, поэтому округление производим до ближайшего четного числа.
$2,451 \approx 2,5$ $2,351 \approx 2,4$	Первая значащая цифра погрешности 2 , поэтому оставляем две значащие цифры. Первая из отбрасываемых цифр 5 , но отбрасываются две цифры, поэтому предыдущий разряд числа увеличиваем на единицу.

**Примеры ограничения количества значащих цифр
в измеренном значении и его погрешности**

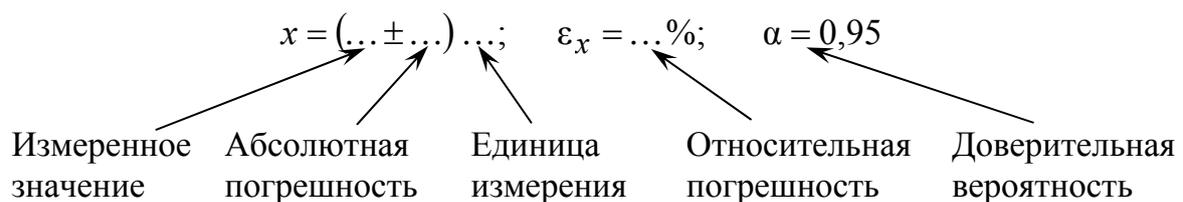
Пример	Пояснения
$43,234 \pm 0,0417 \approx 43,23 \pm 0,04$ $32,3754 \pm 0,0917 \approx 32,38 \pm 0,09$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$4,3234 \pm 0,0397 \approx 4,32 \pm 0,04$ $43,2364 \pm 0,0522 \approx 43,24 \pm 0,05$ $432,37 \pm 0,0917 \approx 432,37 \pm 0,09$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$432,37 \pm 0,956 \approx 432,4 \pm 1,0$ $432,3477 \pm 2,45 \approx 432,3 \pm 2,4$ $432,134 \pm 2,86 \approx 432,1 \pm 2,9$ $43,234 \pm 3,94 \approx 43,2 \pm 3,9$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры, последний разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$43,234 \pm 0,297 \approx 43,2 \pm 3,0$ $432,345 \pm 1,441 \approx 4323,4 \pm 1,4$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры, младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$43,234 \pm 3,97 \approx 43 \pm 4$ $432,364 \pm 5,55 \approx 432 \pm 6$ $432,34 \pm 39,4 \approx 432 \pm 39$ $432,34 \pm 19,37 \approx 432 \pm 19$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – единицы.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – единицы.</p>
$432,34 \pm 49,1 \approx (43 \pm 5) 10$ $426,34 \pm 41,1 \approx (43 \pm 4) 10$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру. Так как за скобки выносим общий множитель 10, то младший разряд – единицы.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – единицы.</p>

Пример	Пояснения
$432,34 \pm 39,7 \approx (4,3 \pm 0,4) 10^2$ $437,34 \pm 59,7 \approx (4,4 \pm 0,6) 10^2$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру. Так как за скобки выносим общий множитель 10^2, то младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$4326,4 \pm 211 \approx (4,33 \pm 0,21) 10^3$ $4323,4 \pm 219 \approx (4,32 \pm 0,22) 10^3$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры. Так как за скобки выносим общий множитель 10^3, то младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$0,0004623 \pm 0,00017 \approx$ $\approx (4,6 \pm 1,7) 10^{-4}$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры. Так как за скобки выносим общий множитель 10^{-4}, то младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>

Если табличные или экспериментальные данные приводятся без указания погрешности, то обычно считается, что эта погрешность составляет $\pm 0,5$ последней значащей цифры.

Форма записи результата измерений

Результат измерений записать в виде



СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Приложение 5

Таблица 1

Единицы СИ

Физическая величина	Единица измерения		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
<i>Основные единицы</i>			
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Температура	кельвин	К	K
Сила электрического тока	ампер	А	A
Количество вещества	моль	моль	mol
Сила света	кандела	кд	cd
<i>Дополнительные единицы</i>			
Плоский угол	радиан	рад	rad
Телесный угол	стерадиан	ср	sr
<i>Производные единицы</i>			
Период	секунда	с	s
Частота периодического процесса	герц	Гц	Hz
Сила	ньютон	Н	N
Энергия	джоуль	Дж	J
Работа	джоуль	Дж	J
Мощность	ватт	Вт	W
Электрический заряд	кулон	Кл	C
Поверхностная плотность электрического заряда	кулон на квадратный метр	Кл/м ²	C/m ²
Объёмная плотность электрического заряда	кулон на кубический метр	Кл/м ³	C/m ³
Напряжённость электрического поля	вольт на метр	В/м	V/m
Потенциал электрического поля	вольт	В	V

Физическая величина	Единица измерения		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
Электрическая ёмкость	фарад	Ф	F
Напряжение, электродви- жущая сила	вольт	В	V
Электрическое сопротив- ление	ом	Ом	Ω
Удельное электрическое сопротивление	ом-метр	Ом·м	$\Omega \cdot m$
Электрическая проводи- мость	сименс	См	S
Удельная электрическая проводимость	сименс на метр	См/м	S/m
Плотность тока	ампер на квадратный метр	A/m ²	A/m ²
Индукция магнитного поля	тесла	Тл	T
Напряжённость магнитно- го поля	ампер на метр	A/m	A/m
Магнитный поток	вебер	Вб	Wb
Магнитный момент конту- ра с током	ампер-квадратный метр	A·м ²	A·m ²
Намагниченность	ампер на метр	A/m	A/m
Индуктивность	генри	Гн	H
Световой поток	люмен	лм	lm
Освещённость	люкс	лк	lx

ДЕСЯТИЧНЫЕ КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

Таблица 2

Десятичные кратные приставки и множители

Приставка			Множитель	Пример
Наименование	Обозначение			
	русское	международное		
экса	Э	E	10^{18}	1 Эм = 10^{18} м
пета	П	P	10^{15}	1 Пм = 10^{15} м
тера	Т	T	10^{12}	1 Тм = 10^{12} м
гига	Г	G	10^9	1 Гм = 10^9 м
мега	М	M	10^6	1 Мм = 10^6 м
кило	к	k	10^3	1 км = 10^3 м
гекто	г	h	10^2	1 гм = 10^2 м
дека	да	da	10^1	1 дам = 10^1 м

Таблица 3

Десятичные дольные приставки и множители

Приставка			Множитель	Пример
Наименование	Обозначение			
	русское	международное		
деци	д	d	10^{-1}	1 дм = 10^{-1} м
сантиметры	с	c	10^{-2}	1 см = 10^{-2} м
милли	м	m	10^{-3}	1 мм = 10^{-3} м
микро	мк	μ	10^{-6}	1 мкм = 10^{-6} м
нано	н	n	10^{-9}	1 нм = 10^{-9} м
пико	п	p	10^{-12}	1 пм = 10^{-12} м
фемто	ф	f	10^{-15}	1 фм = 10^{-15} м

Правила образования наименований и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ

1. Приставку или её обозначение следует писать слитно с наименованием единицы, к которой она присоединяется, или с её обозначением.

2. Присоединение двух и более приставок подряд не допускается.

Правильно:

мегапаскаль

МПа

микрометр

мкм

нанофарад

нФ

Неправильно:

килокилопаскаль

ккПа

миллимиллиметр

ммм

милли микрофарад

ммкФ

3. Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку или ее обозначение присоединяют к наименованию или обозначению первой единицы, входящей в произведение или в отношение.

Правильно:

килопаскаль-секунда на метр

$\frac{\text{кПа} \cdot \text{с}}{\text{м}}$

м

килоньютон на метр

$\frac{\text{кН}}{\text{м}}$

м

Неправильно:

паскаль-килосекунда на метр

$\frac{\text{Па} \cdot \text{кс}}{\text{м}}$

м

ньютон на миллиметр

$\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$

мм

Присоединять приставку ко второму множителю произведения или к знаменателю допускается лишь в обоснованных случаях, когда такие единицы широко распространены и переход к единицам, образованным по правилу, связан с трудностями, например: тонна-километр (т·км), вольт на сантиметр (В/см), ампер на квадратный миллиметр (А/мм²).

Рекомендации по выбору десятичных кратных и дольных единиц СИ

Выбор десятичной кратной или дольной единицы СИ определяется удобством ее применения.

Кратные и дольные единицы выбирают таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

Для уменьшения вероятности ошибок при расчётах десятичные кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10, т. е. множителями 10^n .

В десятичных единицах СИ нет множителей 10^{-4} , 10^4 , 10^{-5} , 10^5 , 10^{-7} , 10^7 и т. п. Поэтому следует применять только те множители, которые приведены в табл. 1, 2.

В десятичных единицах СИ множители 10^{-2} , 10^{-1} , 10^1 , 10^2 используются очень редко, только в виде исключения, поэтому не следует их применять.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Таблица 4

Основные физические постоянные (округленные значения)

Величина	Обозначение	Значение величины
Скорость света в вакууме	c	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Гравитационная постоянная	γ	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н · м ² /кг ²
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
	\hbar	$1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Элементарный электрический заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Комптоновская длина волны электрона	λ_K	$2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Постоянная Ридберга	R	$1,097 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль · К)
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Стефана–Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² · К ⁴)
Боровский радиус	a_0	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Энергия ионизации атома водорода	E_i	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 эВ)

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № ФТТ-1. Измерение зависимости электрического сопротивления металлов и полупроводников от температуры	3
Лабораторная работа № ФТТ-2. Изучение электротермического эффекта Пельтье (термоэлектрический холодильник)	13
Лабораторная работа № ФТТ-3. Измерение вольтамперной характеристики <i>p-n</i> -перехода	21
Лабораторная работа № ФТТ-4. Изучение внешнего фотоэффекта	31
Приложение 1. Оформление протокола и отчета выполнения лабораторной работы	42
Приложение 2. Правила построения графиков	43
Приложение 3. Определение наклона прямой на графике .	49
Приложение 4. Правила представления результатов измерений	51
Приложение 5. Справочные материалы	56

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ФИЗИКИ

Кафедра Физики как общеобразовательная кафедра университета обеспечивает преподавание курса общей физики по двум (стандартной и расширенной) учебным программам в количестве 324 и 500 аудиторных часов для всех дневных факультетов, а также заочного и вечернего отделений. Лекции, практические и лабораторные занятия проводятся в течение 1-4 семестров на 1 и 2 курсах и заканчиваются сдачей зачетов и экзаменов в конце каждого семестра. Также на кафедре физики разработаны и реализуются специализированные дисциплины для студентов старших курсов – физика низких температур, биофизика, специальные и дополнительные главы физики.

Кафедра оснащена учебно-лабораторным оборудованием по всем разделам физики и имеет, помимо традиционных, специализированные компьютеризированные учебные лаборатории по электромагнетизму, колебательным процессам, волновой и квантовой оптике, физике низких температур.

В 2011 г. в соответствии с приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 18.08.2011 г. № 2209 произошло объединение Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) и Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ). После реорганизации в структуре Университета ИТМО с 01.01.2012 г. по 31.08.2015 г. функционировали две кафедры физики: 1) физики-1, заведующий д.т.н., профессор Стафеев Сергей Константинович; 2) физики-2, заведующий д.т.н., профессор Баранов Игорь Владимирович. С 01.09.2015 г. с целью оптимизации образовательного процесса вышеуказанные кафедры объединены в единую кафедру Физики.

Учитывая богатую и плодотворную историю педагогической и научной работы кафедр физики Университета ИТМО и СПбГУНиПТ, ниже представлена краткая историческая справка об их развитии образовательной и научной деятельности.

Кафедра физики Университета ИТМО (1930-2011 гг.).

Преподавание физики как учебной дисциплины велось в Ремесленном училище цесаревича Николая всегда с момента его создания. Механико-оптическое и часовое отделение, а затем — Техникум точной механики и оптики имели в своем составе Физический кабинет. Преподаванию дисциплины Физика для учащихся всегда уделялось большое внимание. В 1930 году при организации вуза — Ленинградского института точной механики и оптики — была организована кафедра Физики как одна из общеобразовательных кафедр.

Организатором и первым заведующим кафедрой Физики явился профессор А.П. Ющенко. Затем в довоенные годы кафедру возглавляли: профессора В.Ф. Трояновский, Л.С. Полак. С 1935 года кафедру возглавил известный специалист в области рентгенометрии профессор И.В. Поройков.

В эвакуации в г. Черепаново Новосибирской области кафедру Физики возглавил известный ученый, сотрудник Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ), занимавшийся дозиметрией и метрологией рентгеновских лучей, профессор К.К. Аглинцев.

С 1945 года кафедру Физики возглавил крупный специалист в области рентгенографии и физики твердого тела профессор Д.Б. Гогоберидзе. В 1946 году профессор Д.Б. Гогоберидзе стал первым деканом нового Инженерно-физического факультета.

Во второй половине 1940-ых годов на кафедре работал выдающийся советский физик-теоретик, член-корреспондент Академии наук СССР Я.И. Френкель. Впоследствии кафедру Физики возглавляли: основоположник теплофизической школы ЛИТМО профессор Г.М. Кондратьев, профессор Н.А. Толстой, доцент С.В. Андреев, доцент А.Ф. Бегункова, профессор А.Я. Вяткин и профессор Н.А. Ярышев.

В течение 16 лет с 1957 по 1973 г. под руководством доктора физико-математических наук, профессора А.Я. Вяткина на кафедре было сформулировано научное направление по исследованию физики взаимодействия электронных пучков с веществом.

С 1973 года на кафедре под руководством профессора Н.А. Ярышева получили развитие научные исследования в области теплофизики, в частности, изучение нестационарной теплопроводности и теплотметрии.

В 1987 году сотрудником кафедры стал С.А. Козлов (ныне декан факультета фотоники и оптоинформатики), Лауреат премии Ленинского комсомола по науке и технике, в 1998 году им была открыта лаборатория волновых процессов.

С конца XX века на кафедре проводится комплексная работа по совершенствованию всего учебного процесса, включая создание фронтальных компьютеризированных учебных лабораторий, банков контроля и проверки усвоения знаний, подготовку программно-методического обеспечения по дистанционному обучению студентов через компьютерные сети RUNNET и INTERNET. В этих учебно- и научно-методических направлениях деятельности кафедры принимали активное участие ведущие сотрудники кафедры доценты С.К. Стафеев (ныне профессор, декан естественнонаучного факультета), Ю.Л. Колесников (ныне профессор, проректор по учебно-организационной и административной деятельности), А.В. Смирнов, А.А. Королев, Г.Л. Башнина, ст.преподаватель С.А. Курашова.

С 2000 по 2015 годы кафедрой заведовал профессор, декан естественнонаучного факультета С.К. Стафеев. Под его руководством было сформировано научное направление, связанное с оптическими методами неразрушающего контроля, сотрудники кафедры А.А. Зинчик, Я.А. Музыченко подготовили и защитили кандидатские диссертации. С.К.Стафеев является организатором и научным руководителем первой в России интерактивной образовательной экспозиция "Музей оптики", созданной в рамках инновационной образовательной программы Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Расположена экспозиция на стрелке Васильевского острова, на первом этаже бывшего дома купца Елисеева. Знакомит с широким кругом применений оптических и оптико-информационных технологий, стимулирует дальнейшее изучение оптики. Главная цель Музея оптики — не только произвести впечатление, но и помочь в обучении школьникам и студентам профильных вузов. Для этого действуют залы практикумов и демонстраций.

Также С.К. Стафеев является куратором выставки Magic of light (Магия света) проходящей с России в рамках в рамках международного Года света, проводимого в 2015 г. в соответствии с решением Генеральной Ассамблеи ООН.

Кафедра физики СПбГУНиПТ (1931-2011 гг.).

В составе Университета низкотемпературных и пищевых технологий кафедра физики существовала с момента его основания в 1931 г. и обеспе-

чивала фундаментальную общенаучную подготовку инженеров по всем специальностям.

Кафедрой руководили известные в СССР и России ученые, авторы многочисленных научных работ, монографий, учебников и учебных пособий по физике: доцент А.Н. Святозаров (1931 – 1942 гг.), профессор Л.М. Розенфельд (1942-1949 гг.), доцент Е.А. Штрауф (1949-1959 гг.), доцент К.В. Струве (1960-1968 гг.), профессор Н.В. Солнцев (1969-1975 гг.), заслуженный деятель науки РФ профессор Е.С. Платунов (1975-2002 гг.), профессор С.Е. Буравой (2002-2010 гг.), профессор И.В. Баранов (2010-2011 гг.).

В 1976-1985 гг. по инициативе заведующего кафедрой Е.С. Платунова коллективом кафедры была осуществлена коренная реконструкция учебно-лабораторной базы. Была переосмыслена логика проведения лабораторных и практических занятий и их связь с лекционной теоретической частью курса. В основу реорганизации была положена идея системного объединения всех видов занятий в логически обоснованную схему фронтального обучения «лекция – практическое занятие – лабораторная работа». Было создано 5 оригинальных учебных лабораторий стендового типа, охватывающих основные разделы курса: 1) Лаборатория физической механики (авторы - профессор Е.С. Платунов, доценты В.В. Курепин, З.В. Сигалова, старший преподаватель Л.В. Соколова); 2) Лаборатория термодинамики и молекулярной физики (Е.С. Платунов, В.В. Курепин, З.В. Сигалова); 3) Лаборатория электромагнетизма (доценты Д.Ю. Иванов, Э.Л. Китанина, А.Ф. Костко, С.М. Бунин); 4) Лаборатория оптики и атомной физики (доценты Л.С. Крайнова, С.Е. Буравой, В.А. Самолетов, преподаватели В.А. Павлов, В.А. Рыков); 5) Лаборатория физики твердого тела (доцент В.И. Соловьев, профессор Н.В. Солнцев, доцент В.М. Козин).

Каждая лаборатория имеет в своем составе 15 стендов, рассчитанных на проведение от 10 до 20 различных лабораторных работ по всем основным темам соответствующего раздела курса. Многие лабораторные работы отличаются оригинальным содержанием и не имеют аналогов в других учебных заведениях. Стенды оснащены современными приборами (цифровыми вольтметрами, лазерами, монохроматорами и т. п.).

Преподавателями кафедры был выполнен большой объем методической работы: составлено и издано около 100 новых оригинальных методических указаний по выполнению лабораторных работ, В.В. Курепиным, И.В. Барановым и В.Е. Куцаковой разработано пособие по оценке погрешностей в лабораторных работах, выдержавшее более 5 изданий.

В 1995-2005 г.г. профессором Е.С. Платуновым подготовлено и дважды издано учебное пособие по курсу общей физики в четырех томах общим объемом около 80 печ. листов.

В 2002 – 2006 гг. для студентов, обучающихся по специальности «Техника и физика низких температур», и магистров всех специальностей создана не имеющая аналогов учебно-исследовательская лаборатория «Физика низких температур» (авторы проф. Е.С. Платунов, проф. И.В. Баранов, проф. В.В. Курепин, доценты В.М. Козин, С.С. Прошкин). Авторским коллективом (Е.С. Платунов, И.В. Баранов, Е.В. Тамбулатова, А.Е. Платунов) издано учебное пособие для этой лаборатории с аналогичным названием. Лаборатория оснащена 15 автоматизированными стендами каждый из которых позволяет выполнить 13 лабораторных работ по изучению физических свойств веществ в области температур от минус 196 °С до 100 °С.

В 2002 – 2004 гг. преподавателями кафедры С.С. Прошкиным, Н.В. Нименским, В.А. Самолетовым подготовлено и издано учебное пособие «Сборник задач» с методическими указаниями и примерами решения. Сборник содержит около 1700 задач в трех книгах по разделам «Молекулярная физика и термодинамика», «Электродинамика и электромагнитные волны», «Квантовая физика».

Сотрудниками кафедры (проф. Е.С. Платунов, проф. В.А. Самолетов, проф. С.Е. Буравой) подготовлен и дважды издан словарь-справочник «Физика», объемом 40 печ. листов. Доцентом С.С. Прошкиным подготовлено и издано в 2009 году учебное пособие «Физика. История и развитие» объемом около 40 печатных листов для студентов, обучающихся по специальности «Экономика и менеджмент», а также аспирантов и магистров всех специальностей.

На кафедре физики под руководством профессора Е.С. Платунова к началу 80-х годов прошлого столетия сложилась оригинальная самостоятельная научная школа теплофизиков-прибористов, получившая мировое признание и известность.

В 1977 г. при кафедре была открыта Отраслевая научная лаборатория динамических методов теплофизических измерений и приборов. Лаборатория стала базой для научного роста аспирантов и инженеров, формирования нового поколения преподавателей кафедры.

Совместно с ГСКБ теплофизического приборостроения (ГСКБ ТФП) за 15 лет функционирования лаборатории было создано более двадцати различных образцов приборов для изучения теплофизических свойств веществ, охватывающих в совокупности диапазон температур от 4,2 до 1200 К. Некоторые из них были приняты к промышленному производству

и выпускались серийно на опытном производстве ГСКБ ТФП и на одном из заводов Казахстана вплоть до распада СССР в 1991 году. По своей методической сути эти разработки значительно превышали уровень таких известных фирм, как «Dynatech» (США), «Feuotron» (ФРГ), «Setaram» (Франция). Созданные приборы обладали большой производительностью, позволяя за один эксперимент изучать температурную зависимость измеряемых параметров (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность). В Советском Союзе основной объем информации о теплофизических свойствах твердых веществ в области от 200 до 700 К был получен на приборах, разработанных научной школой профессора Е.С. Платунова. Во многих научных и учебных лабораториях стран СНГ эти приборы успешно функционируют и в настоящее время.

По данной научной тематике к 1992 году было опубликовано свыше 150 статей, получено 40 авторских свидетельств на изобретения. Разработаны оригинальные методы исследования теплофизических свойств в области криогенных температур (от 4,2 до 300 К). Созданы средства измерения, не требовавшие специальных криостатирующих устройств, экспрессные по своей сути, что означало значительный прорыв в области техники низкотемпературного теплофизического эксперимента.

Сотрудниками кафедры проведены оригинальные исследования в области создания методов и средств неразрушающего контроля тепловых свойств материалов и изделий. Эти разработки стали основой кандидатских диссертаций Е.А. Белова и Г.Я. Соколова.

В 1976 г. на кафедре развивалась научное направление, связанное с поиском методов построения уравнений состояния и расчетом свойств индивидуальных веществ идеальных газов, имеющих широкое применение в холодильной и криогенной технике. По результатам этих исследований были защищены 4 кандидатских и 2 докторские диссертации, опубликовано более 70 научных статей в отечественных и зарубежных журналах.

С 1992 года ведется поиск новых методов определения тепловых и влажностных характеристик разнообразных групп дисперсных влагосодержащих материалов в условиях их промерзания и размораживания. В настоящее время создан комплекс автоматизированных приборов, позволяющих изучать кинетику изменения энтальпии, дифференциальной теплоты плавления, теплопроводности и влагосодержания пищевых материалов животного и растительного происхождения в области температур от минус 30 °С до 40 °С, в условиях замораживания и размораживания продуктов, разработаны приборы, предназначенных для измерения интенсивности внутренних тепловых источников, непрерывно действующих в пищевых продуктах в условиях их производства и хранения.

При кафедре под руководством профессоров Е.С. Платунова и И.В. Баранова с 2008 г. функционирует научная лаборатория «Теплофизические измерения и приборы». В лаборатории создан комплекс методов автоматизированных приборов для изучения теплопроводности, теплоемкости, теплоты структурных и фазовых переходов в различных веществах, в том числе в процессах замораживания, оттайки, исследуются свойства пищевых продуктов и конструкционных материалов холодильной и криогенной техники.

Коллективом преподавателей кафедры по этому направлению подготовлена к изданию фундаментальная монография «Теплофизические измерения», обобщающая исследования авторов за последние 30 лет.

С конца 60-х годов на кафедре проводятся экспериментальные и теоретические исследования фазовых переходов и критических явлений. Начало этим работам было положено исследованием гравитационного эффекта вблизи критической точки парообразования, проведенным доцентом Д.Ю. Ивановым. В 80-ые годы группой сотрудников кафедры были проведены работы по корреляционной спектроскопии многократно рассеянного света. По результатам этих исследований опубликована серия научных статей, сделано более 10 докладов на конференциях и защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В 90-х годах совместно с одним из ведущих университетов Франции проводились исследования процессов нуклеации наночастиц в растворах. Совокупные результаты исследований критических явлений легли в основу докторской диссертации доцента Д.Ю. Ивановым (2001 г.) и его монографии «Критическое поведение неидеализированных систем».

Научные исследования в области фазовых переходов, предпереходных явлений и рассеяния света в сложных жидких системах успешно развивает доцент, кандидат физико-математических наук А.Ф. Костко. Во время многолетней стажировки в ведущих университетах США А.Ф. Костко совместно с американскими коллегами методами рассеяния света проводил исследования растворов полимеров, водных растворов электролитов, биогелей и лиотропных хромонических жидких кристаллов в широком диапазоне температур и давлений. Результаты этих исследований, проведенных А.Ф. Костко после 2000 года, опубликованы в 13 статьях в ведущих международных научных журналах по физике и химии, а также доложены на 15 международных конференциях.

На сегодня кафедра Физики – одна из крупнейших в университете – представляет собой динамично развивающийся творческий коллектив, способный решать масштабные задачи развития и подготовки инженерных и научно-педагогических кадров. В связи с реорганизацией и объединени-

ем кафедр с 1 сентября 2015 года кафедра Физики находится под руководством доктора технических наук, профессора Игоря Владимировича Баранова.

С 2010 г. Игорь Владимирович является членом докторского диссертационного Совета Д 212.234.01. Им опубликовано 57 научных и 7 учебно-методических работ. За последние 3 года издано: 21 научная работа и 2 учебно-методических работы, в том числе в соавторстве Барановым И.В. в 2010 г. издано учебное пособие “Теплофизические измерения” с грифом УМО по политехническому образованию. Баранов И.В. выступал с докладами на 25 международных и всероссийских научных конференциях. Баранов И.В. является с 2008 г. академиком Международной академии холода. Исполняет обязанности заместителя главного редактора научно-технического журнала “Вестник МАХ”.

В настоящее время коллектив кафедры включает в себя 30 преподавателей и 10 учебно-вспомогательного персонала.

Под руководством профессора кафедры физики ИТМО Чирцова А.С. и доцента Демидова В.И. из Университета Западной Вирджинии работает Международная лаборатория «Нелокальная плазма в нанотехнологиях и медицине, которая ведет исследования по следующим направлениям:

- Исследование параметров нелокальной плазмы модифицированного короткого газового разряда постоянного тока с накаливаемым катодом
- Плазмохимическое моделирование разрядов в газах SF₆ и O₂
- Изучение особенностей дрейфа микрочастиц в плазме, обусловленных спецификой функции распределения электронов по энергиям в нелокальной плазме
- Моделирование разряда с использованием аналитических методов

Силами профессора А.С.Чирцова и старшего преподавателя С.А.Курашовой создаются on-line курсы по физике, которые размещены в Lectorium на сайте Университета ИТМО.

Под руководством С.К.Стафеева на кафедре Физики в 2016 году открыта программа подготовки магистров по уникальному в России направлению Science communications.

Самолетов Владимир Александрович
Тамбулатова Екатерина Викторовна

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49**