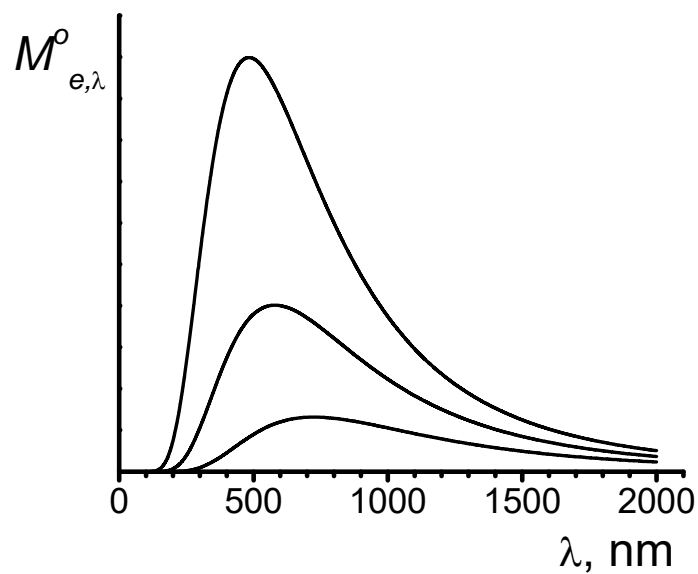


И.В. Баранов

В.А. Самолетов

В.Л. Частый

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО КВАНТОВОЙ И АТОМНОЙ ФИЗИКЕ**



Санкт-Петербург
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**И.В. Баранов,
В.А. Самолетов,
В.Л. Частый**

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО КВАНТОВОЙ И АТОМНОЙ ФИЗИКЕ
Учебно-методическое пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2017

УДК 530

Баранов И. В., Самолетов В. А., Частый В. Л. Физика. Лабораторные работы по квантовой и атомной физике: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 77 с.

Дано краткое теоретическое обоснование методов измерения, изложен порядок 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 форм 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

© Баранов И.В., Самолетов В.А., Частый В.Л. 2017

ВВЕДЕНИЕ

Фронтальная лаборатория оптики и атомной физики создавалась в СПбГУНиПТ (бывший ЛТИХП) на кафедре физики в 1976–1982 гг. под методическим руководством и с непосредственным участием доцента кафедры Крайновой Л.С. Техническая часть и методические указания разрабатывались ею совместно с доцентом Буравым С.Е. Всего было поставлено около 30 оригинальных лабораторных работ, охвативших семь основных разделов курса. Отдельные этапы работы выполнялись с участием преподавателей кафедры физики Рыкова А.В., Терещенко Л.Л., Годвинской Н.В., Павлова В.А., Самолетова В.А., Баранова И.В., Частого В.Л.

В последние годы в лаборатории проведена модернизация ряда работ, переработаны практическая часть работ и описания к ним, что и нашло отражение в данных методических указаниях. При этом сохранен фронтальный принцип проведения занятий. Лабораторные работы соответствуют учебной программе курса физики.

В данных методических указаниях дано описание трех лабораторных работ, связанных с разделом волновой и квантовой оптики общего курса физики.

Все работы, выполняемые в лаборатории оптики, рассчитаны на два учебных часа.

Защита лабораторных работ производится на плановых занятиях. Во время защиты студент сдает отчет, содержащий все пункты задания, и отвечает на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях к выполненной работе.

Для удобства студентов в каждой работе приводится список литературы и ссылки на конкретные разделы и параграфы, в приложениях к методическим указаниям даны необходимые справочные материалы.

Инструктаж по технике безопасности в лаборатории проводится преподавателем на первом занятии. В описании всех работ дан раздел, в котором названы возможные источники опасности, такие как излучение лазеров и спектральных ламп, высокое электрическое напряжение, высокие температуры источников, наличие паров ртути в лампах, а также сформулированы правила безопасной работы в лаборатории.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.1

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С РАБОТОЙ МОНОХРОМАТОРА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ВЕЩЕСТВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с принципом действия и работой монохроматора. Получить градуировочную кривую монохроматора $\lambda = f(\alpha)$ и рассчитать его разрешающую способность. Измерить длины волн характерных линий в спектре цезия, кадмия или натрия.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Необходимое оборудование:

- оптическая скамья;
- монохроматор;
- спектральная лампа с ртутью;
- спектральные лампы с цезием, кадмием или натрием;
- собирающая линза;
- блоки питания спектральных ламп.

Характеристики средств измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность $\Delta_{\text{и}}$
Монохроматор УМ-2	380 – 1000 нм	2 град/дел	–	± 1 град

УКАЗАНИЕ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Монохроматор питается от сети переменного тока напряжением 220 В, а напряжение на спектральных лампах составляет 300 В, что создает опасность поражения электрическим током. Одна из ламп содержит пары ртути. Поэтому при работе на установке необходимо соблюдать следующие меры безопасности.

1. Не разрешается включать установку в отсутствие преподавателя или лаборанта.
2. Запрещается оставлять установку включенной.
3. Перемещать спектральные лампы по оптической скамье можно только при выключенном источнике питания.
4. Строго соблюдать правила включения монохроматора и спектральных ламп.
5. Запрещается работать с ртутной лампой при отсутствии защитного стекла.
6. Выключить монохроматор и спектральные лампы после выполнения измерений.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Дисперсия света

Действие монохроматора основано на использовании явления дисперсии света.

Дисперсией света называется явление, обусловленное зависимостью показателя преломления вещества от длины световой волны. Эту зависимость можно охарактеризовать функцией

$$n = f(\lambda_0), \quad (1)$$

где λ_0 - длина света световой волны в вакууме.

Дисперсией вещества называется производная $dn/d\lambda_0$.

Для всех прозрачных бесцветных веществ функция (1) имеет в видимой части спектра характер, показанный на рис. 1.

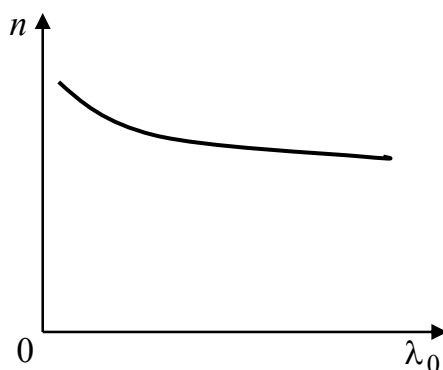


Рис. 1. Зависимость показателя преломления от длины волны

С уменьшением длины волны показатель преломления увеличивается со все возрастающей скоростью, так что дисперсия вещества $dn/d\lambda_0$ отрицательна и растет по модулю с уменьшением λ_0 . Такая дисперсия называется *нормальной*.

Если вещество поглощает часть лучей, то вблизи области поглощения в ходе кривой $n(\lambda_0)$ обнаруживается аномалия (рис. 2). Дисперсия вещества $dn/d\lambda_0$ оказывается положительной. Такой ход зависимости $n(\lambda_0)$ называется *аномальной дисперсией*.

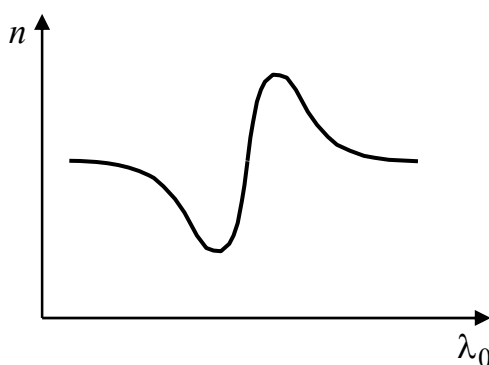


Рис. 2. Зависимость показателя преломления от длины волны в области поглощения

Явление дисперсии по электронной теории объясняется взаимодействием электромагнитного излучения с заряженными частицами вещества, совершающими вынужденные колебания в переменном электромагнитном поле волны.

Характеристика спектральных приборов

Явление дисперсии используется в приборах, предназначенных для разложения сложного света на составляющие и их пространственного разделения по длинам волн.

Основной частью таких приборов являются призмы. Материалы, используемые для изготовления дисперсионных призм должны быть прозрачными в широкой области длин волн, оптически однородными при больших геометрических размерах, изотропными, химически устойчивыми, должны хорошо поддаваться оптической обработке. При выборе материала призм решающую роль играют показатель преломления n и дисперсия вещества $dn/d\lambda$. Так как последняя величина определяет угловую дисперсию спектрального прибора

и его разрешающую способность, желательно иметь большие значения $dn/d\lambda$.

Дисперсия и разрешающая способность спектральных приборов

Спектральный прибор служит для обнаружения излучения и анализа распределения его по длинам волн. Монохроматическое излучение реального источника, подаваемое в спектральный прибор, регистрируется не в виде узкой линии определенной интенсивности с частотой ω (рис. 3, а), а в виде кривой, представляющей распределение энергии по частотам (рис. 3, б).

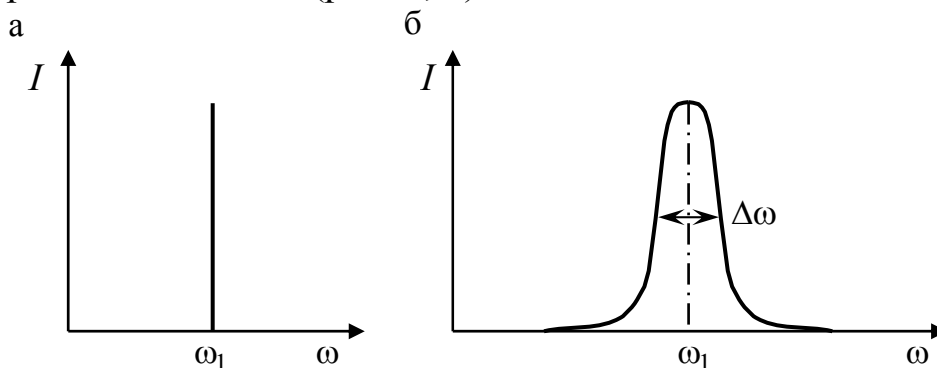


Рис. 3. Интенсивность монохроматического излучения: а – идеального источника; б – реального источника

В зависимости от крутизны кривой интенсивности соседние максимумы длин волн λ_1 и λ_2 могут наблюдаться как два самостоятельных или как один максимум (рис. 4).

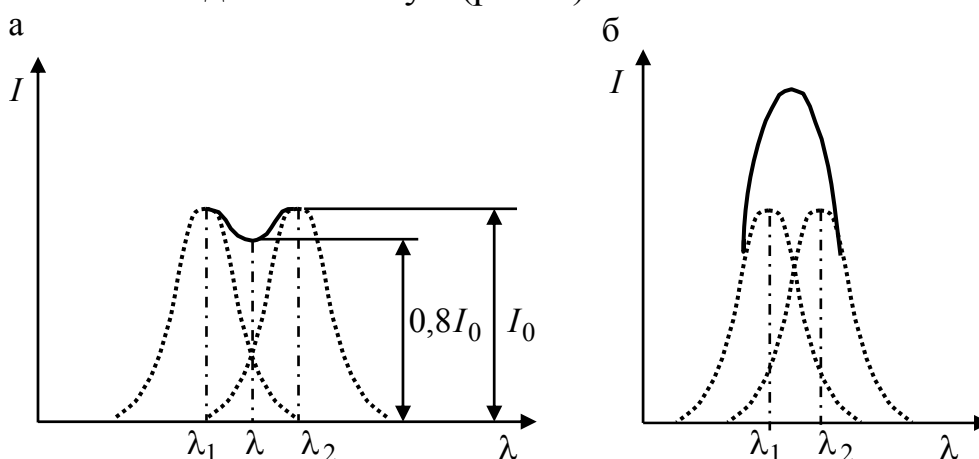


Рис. 4. Условия различимости соседних линий спектра: а – две линии различимы; б – две линии не различимы

Согласно Рэлю две близлежащие спектральные линии с равными интенсивностями и одинаковыми симметричными контурами разрешимы, если максимум одной длины волны λ_1 совпадает с минимумом другой λ_2 (рис. 4, а). При удовлетворении этого условия интенсивность «провала» между максимумами составляет 80 % интенсивности каждой линии, что является достаточным для отдельного наблюдения линий λ_1 и λ_2 . Нарушение критерия Рэля приводит к наблюдению одной линии вместо двух (рис. 4, б).

Если разность $\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda$, а средняя длина волны, соответствующая центру провала между максимумами λ (рис. 4, а) то в качестве количественной характеристики разрешающей способности спектрального прибора берется отношение

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}.$$

Устройство и принцип действия универсального монохроматора УМ-2

Принципиальная оптическая схема универсального монохроматора УМ-2 представлена на рис. 5. Прибор выделяет монохроматические участки спектра в видимой и ближней инфракрасной областях с длинами волн 380...1000 нм.

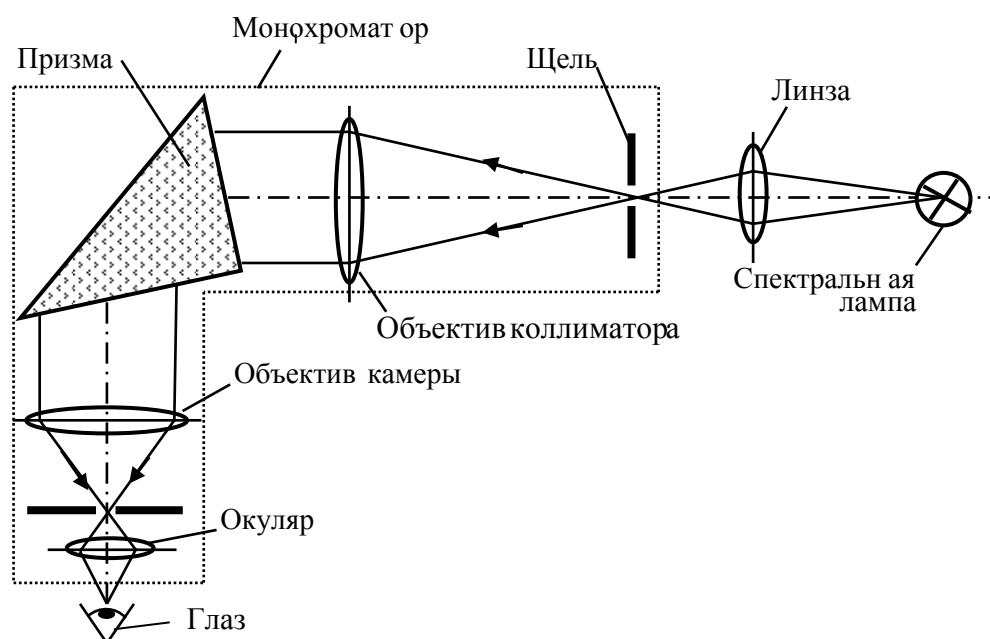


Рис. 5. Принципиальная оптическая схема монохроматора

Свет от источника освещает входную щель, расположенную в фокальной плоскости объектива коллиматора. После объектива параллельный пучок света проходит через диспергирующую систему призм (призму), при помощи которой свет разлагается на спектральные линии. Объектив камеры дает изображение щели в своей фокальной плоскости (воображаемая плоскость) в виде ряда спектральных линий. Наблюдение спектральных линий производится глазом через окуляр.

Внешний вид монохроматора представлен на рис. 6.

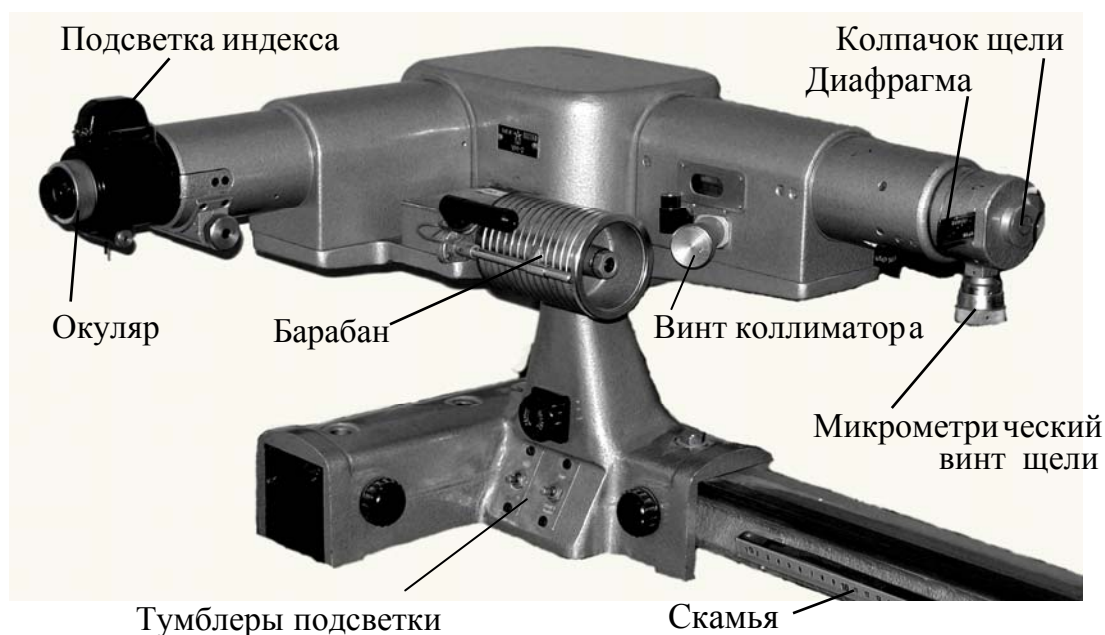


Рис. 6. Внешний вид монохроматора

Монохроматор укреплен на оптической скамье, на которой также установлены спектральная лампа и собирающая линза. Объектив коллиматора, диспергирующая призма, объектив камеры и окуляр размещены внутри корпуса прибора. Ширина входной щели регулируется микрометрическим винтом, а ее длина устанавливается выдвинутой диафрагмой в виде пластины.

В фокальной плоскости объектива камеры имеется индекс в виде треугольника, который подсвечивается лампочкой на тубусе окуляра. Индекс виден через окуляр и служит для определения положения спектральных линий. Вращая окуляр, получают резкое изображение индекса.

На корпусе монохроматора расположен винт коллиматора, который служит для фокусировки коллиматора, обеспечивая резкое изображение спектральных линий.

Поворот диспергирующей призмы осуществляется вращением барабана, который имеет спиральную шкалу с цифровыми делениями от 0 до 3500 град. Шкала имеет оцифровку 0, 50, 100, 150 град и т.д. Цена малого деления шкалы составляет 2 град. При повороте барабана на одно деление (2 град.) диспергирующая призма поворачивается на угол 20 секунд. При повороте барабана поворачивается диспергирующая призма и происходит перемещение спектра таким образом, что можно установить в поле зрения окуляра любую спектральную линию и совместить ее с индексом.

Перед использованием монохроматора необходимо провести его градуировку, чтобы выразить показания шкалы барабана α в длинах волн λ .

Для градуировки шкалы в данной работе используется спектральная лампа с ртутью. Расположение характерных линий в спектре ртути показано на рис. 7, а их длины волн, цвет и интенсивность приведены в табл. 2.

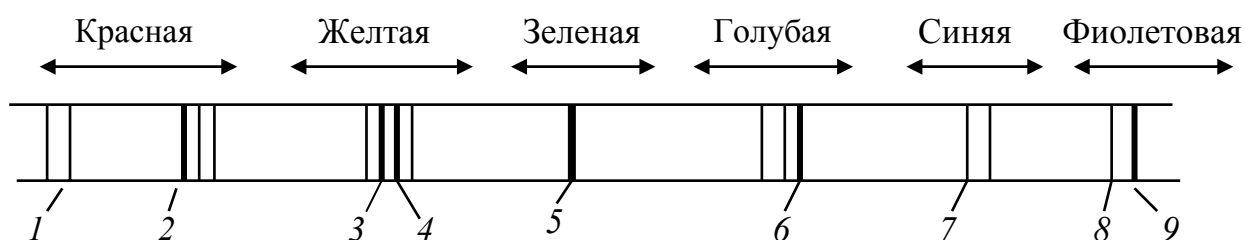


Рис. 7. Спектр ртути

Таблица 2

Номер линии	Цвет линии	λ , нм	I	$\alpha_{\text{пр}}$, град	$\alpha_{\text{обр}}$, град	α , град
1	красный	690,75	25			
2	красный	623,44	24			
3	желтый	578,97	100			
4	желтый	576,96	100			
5	зеленый	546,07	320			
6	голубой	491,61	100			
7	синий	435,83	400			
8	фиолетовый	407,78	100			
9	фиолетовый	404,66	180			

Порядок выполнения работы

1. Спектральную лампу с ртутью установить на оптическую скамью на расстоянии около 0,5 м от входного окна щели монохроматора. На блоке питания ртутной лампы (рис. 8) включить тумблеры «Сеть», «Лампа ДРШ» и нажать кнопку «Пуск». При этом будет подано питание на монохроматор и начнется разряд в ртутной лампе. Наибольшей яркости свечение паров ртути в лампе достигает через 1...3 минуты.



Рис. 8. Блок питания спектральной лампы с ртутью

2. На оптическую скамью между входным окном щели монохроматора и спектральной лампой установить линзу. На входное окно щели надеть колпачок и, передвигая линзу вдоль скамьи, получить резкое изображение разряда лампы в центре колпачка.

3. Снять колпачок со щели, включить на монохроматоре тумблеры подсветки (рис. 6).

4. Вращая барабан, перевести указатель барабана на первую треть шкалы. Наблюдая в окуляр, вращать кольцо окуляра до получения резкого изображения индекса (в дальнейшем кольцо больше не вращать!).

Затем, вращая винт коллиматора и регулируя микрометрическим винтом ширину щели, получить резкое изображение спектральных линий.

5. Прокручивая барабан, посмотреть спектр ртути и найти характерные линии спектра, выделенные на рис. 7 и в табл. 2.

Внимание! При наблюдении линий спектра рекомендуется уменьшать ширину щели для ярких линий и увеличивать для слабых, а также проводить дополнительно наводку на резкость линий, лежащих в разных частях спектра.

Измерить угол на шкале барабана для всех линий, указанных в табл. 2. Измерение углов $\alpha_{\text{пр}}$ провести сначала в прямом направлении, начиная вращать барабан от красной линии, а затем в обратном направлении $\alpha_{\text{обр}}$, вращая барабан от фиолетовой линии. Поскольку барабан имеет люфт, вращать его следует строго в одном направлении. Начинать измерения в прямом и обратном направлениях следует смещаясь за крайние линии (красная и фиолетовая соответственно) не менее, чем на 20 градусов. Измеренные значения записать в табл. 2.

6. На блоке питания ртутной лампы (рис. 8) выключить тумблер «Лампа ДРШ», установив его в нижнее положение, и снять спектральную лампу с оптической скамьи.

7. Надеть колпачок на щель монохроматора. Установить на оптическую скамью на расстоянии около 0,5 м от щели спектральную лампу с заданным веществом и включить ее. Для этого на блоке питания (рис. 9) ручку регулятора анодного тока повернуть против часовой стрелки до упора. После этого включить тумблеры «Сеть» и «Анод» (верхнее положение). Дать блоку прогреться в течении 2-3 минут. Ручкой регулятора медленно увеличивать анодный ток, наблюдая за показаниями миллиамперметра.

Внимание! После достижения тока зажигания (появится свечение разряда в окне лампы), ток уменьшит до рекомендуемого значения, указанного на данной установке.



Рис. 9. Блок питания ламп с цезием, кадмием или натрием

8. Перемещая линзу вдоль скамьи, получить резкое изображение светящегося разряда в перекрестье колпачка. Снять колпачок со щели.

9. Для закрепления методики работы на монохроматоре провести измерение наиболее ярких линий заданного вещества по одной в красной, желтой, зеленой, голубой, синей и фиолетовой областях спектра. Измерения достаточно провести только в одном направлении, результаты измерений занести в табл. 3.

10. В каждой цветовой области (исключая фиолетовую) выбрать по две наиболее близко расположенные друг к другу линии и измерить для них углы α_1 и α_2 . Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

Номер измерения	Цвет линии	α_1 , град	α_2 , град	λ_1 , нм	λ_2 , нм	R
1	красный					
2	желтый					
3	зеленый					
4	голубой					
5	синий					
6	фиолетовый					

Внимание! Табл. 2 и 3 с результатами измерений подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

11. На блоке питания спектральной лампы заданного вещества (рис. 9) ручку регулятора анодного тока повернуть против часовой стрелки до упора, выключить тумблер «Анод» и «Сеть». Выключить два тумблера на монохроматоре, закрыть колпачком входное отверстие щели.

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 2 вычислить среднее значение угла барабана

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{обр}}}{2}.$$

2. На миллиметровой бумаге размером не менее 200 x 300 мм² построить график зависимости длины волны от угла поворота барабана

$$\lambda = f(\alpha).$$

Градуировочный график должен иметь вид плавной кривой без перегибов. Все 9 точек должны лежать на этой кривой.

3. По данным табл. 3 с помощью градуировочной кривой монохроматора $\lambda = f(\alpha)$ найти значения длин волн λ_1, λ_2 для шести цветовых областей спектра заданного вещества и занести их в табл. 3.

4. Рассчитать оценочное значение разрешающей способности монохроматора для различных цветовых областей спектра по формуле

$$R = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)}.$$

Результаты занести в табл. 3.

Результатом работы являются:

1. График $\lambda = f(\alpha)$ градуировки монохроматора на миллиметровой бумаге.
2. Оценочное значение разрешающей способности монохроматора для различных цветовых областей спектра

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. График зависимости $\lambda = f(\alpha)$.
2. Заполненные табл. 2 и 3, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.
3. Пример расчета оценочного значения разрешающей способности монохроматора для одной из цветовых областей спектра.
4. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

Контрольные вопросы

1. Что такое дисперсия света? Что такое дисперсия вещества?

Литература: [1, 8.10]; [2, § 185, 186]; [3, § 142].

2. Что называется фазовой скоростью электромагнитной волны и от чего она зависит?

Литература: [1, 8.7]; [2, § 185, 186]; [3, § 143].

3. Что такое нормальная и аномальная дисперсия вещества?

Литература: [1, 8.10]; [2, § 185, 186]; [3, § 142 – 144].

4. Как объясняется явление дисперсии света электронной теорией?

Литература: [2, § 186, 187].

4. Как определяется разрешающая способность монохроматора? Критерий Рэлея для отдельного наблюдения двух линий.

Литература: [Метод. указ. к данной работе].

5. В чем заключается принцип действия и назначение основных узлов монохроматора?

Литература: [Метод. указ. к данной работе].

6. Что такое градуировка монохроматора и как она проводится?

Литература: [Метод. указ. к данной работе].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С., Самолетов В.А., Буравой С.Е.** Физика. Т.3. Электродинамика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006.– 406 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2005. – 542 с.

3. **Савельев И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 13-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2017. – 500 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/91065>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕПЕНИ В ЗАКОНЕ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Измерить показатель степени в законе Стефана-Больцмана, ознакомиться с принципом действия и устройством яркостного пирометра. Научиться проводить измерения температуры пирометром.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Необходимое оборудование:

- оптическая скамья;
- температурная лампа;
- оптический яркостный пирометр;
- блок питания температурной лампы и пирометра.

Характеристики средств измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность $\Delta_{и}$
Оптический пирометр ОППИР-09	800...2000 °С	20 °С/дел	–	30 °С
Цифровой вольтметр	10 В	0,001 В/дел	–	0,01 В

УКАЗАНИЕ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Поскольку в данной работе используются приборы и устройства, питание которых осуществляется от сети переменного напряжения 220 В, возможно поражение электрическим током. Поэтому при выполнении работы необходимо соблюдать следующие меры безопасности.

1. Не разрешается включать установку в отсутствие преподавателя или лаборанта.
2. Запрещается оставлять установку включенной.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Интенсивность теплового излучения характеризуется величиной потока энергии E в единицу времени и измеряется в ваттах (мощность). Мощность излучения с единицы поверхности (плотность потока излучения) по всем длинам волн и направлениям в пределах телесного угла 2π при температуре T называется *энергетической светимостью* R_T . Измеряется в ваттах на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$)

$$R_T = \frac{dE}{dS}. \quad (1)$$

Если в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$ плотность потока излучения составляет $dR_{\lambda,T}$, то величина

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_{\lambda,T}}{d\lambda} \quad (2)$$

характеризует мощность излучения в единичном интервале длин волн при данной длине волн λ и называется *испускательной способностью* тела. Измеряется в ваттах на кубический метр ($\text{Вт}/\text{м}^3$).

Величину R_T иногда называется *интегральной или полной излучательной способностью*, а $r_{\lambda,T}$ — *спектральной или монохроматической излучательной способностью*.

Энергетическая светимость R_T и испускательная способность $r_{\lambda,T}$ зависят от природы тела и его температуры T , а $r_{\lambda,T}$ еще и от длины волны излучения λ . Эти зависимости отмечены в формулах (1) и (2) индексами λ и T .

Очевидно, что

$$R_T = \int_0^{\infty} dR_{\lambda,T} = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (3)$$

Характеристиками теплового излучения тела в заданном по отношению к нормали направлении ϑ в единице телесного угла Ω (стерадиан, ср.) являются энергетическая B_T и спектральная $b_{\lambda,T}$ яркости:

$$B_T = \frac{dR_T}{d\Omega \cos \vartheta}, \quad b_{\lambda,T} = \frac{dr_{\lambda,T}}{d\Omega \cos \vartheta}.$$

Если источник наблюдения является точечным, то чем дальше он находится от места наблюдения, тем меньше энергии от него доходит. Но одновременно уменьшается и телесный угол Ω , под которым виден источник излучения. Количество дошедшей энергии R_T и телесный угол Ω пропорциональны r^{-2} . Поэтому яркость принимаемого излучения не зависит от расстояния до источника.

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется *поглощательной способностью* $\alpha_{\lambda,T}$, под которой понимается доля поглощенной поверхностью энергии $dE_{\lambda,\alpha}$ в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ от общего количества падающего излучения dE_λ в том же интервале длин волн

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{dE_{\lambda,\alpha}}{dE_\lambda}. \quad (4)$$

Очевидно, что $\alpha_{\lambda,T}$ зависит от температуры тела и длины волны и не может быть больше единицы. Тело, у которого $\alpha_{\lambda,T} = 1$ для всех длин волн и температур, т.е. которое поглощает всю падающую на него энергию, называется *абсолютно черным телом*. В дальнейшем все обозначения, относящиеся к излучению абсолютно черного тела, будут иметь индекс «0» (например, R_T^0 ; $r_{\lambda,T}^0$; $\alpha_{\lambda,T}^0 = 1$).

Законы теплового излучения

В 1859 г. Кирхгоф установил, что *отношение испускательной $r_{\lambda,T}$ к поглощательной $\alpha_{\lambda,T}$ способности тела не зависит от его природы и является универсальной для всех тел функцией длины волны и температуры:*

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_3 = \dots = f(\lambda, T). \quad (5)$$

Тело, излучающее больше энергии, будет больше и поглощать, т.е. большей $r_{\lambda,T}$ будет соответствовать и большее значение $\alpha_{\lambda,T}$. Значит, абсолютно черное тело имеет и наибольшую испускательную способность.

Так как у абсолютно черного тела $\alpha_{\lambda,T}^0 = 1$, то

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = \frac{r_{\lambda,T}^0}{1} = r_{\lambda,T}^0 = f(\lambda, T), \quad (6)$$

где $f(\lambda, T)$ – универсальная функция Кирхгофа, которая представляет собой зависимость испускательной способности абсолютно черного тела $r_{\lambda,T}^0$ от λ и T .

Обычно закон Кирхгофа записывается в следующем виде:

$$r_{\lambda,T} = \alpha_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^0. \quad (7)$$

Таким образом, знание вида зависимости $r_{\lambda,T}^0 = f(\lambda, T)$ для абсолютно черного тела дает возможность рассчитать излучение любого тела, если известна его поглощательная способность $\alpha_{\lambda,T}$.

В 1900 г. Макс Планк на основании гипотезы о квантовом характере излучения нашел вид функции $f(\lambda, T)$, в точности соответствующий экспериментальным данным.

Аналитическое выражение для испускательной способности абсолютно черного тела имеет вид:

$$r_{\lambda,T}^0 = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}. \quad (8)$$

Эта функция известна под названием формулы Планка. Здесь k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; c – скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $e = 2,7182$ – основание натуральных логарифмов.

На рис. 1 приведена зависимость $r_{\lambda,T}^0$ от длины волны при различных температурах. Видно, что $r_{\lambda,T}^0$ имеет ярко выраженный максимум, положение которого зависит от температуры T . При увеличении температуры T значение $r_{\lambda,T}^0$ увеличивается по всему спектру, а максимум функции смещается в сторону коротких волн.

Если проинтегрировать формулу Планка (8) по всему интервалу длин волн от 0 до ∞ , то в соответствии с (3) получим энергетическую светимость абсолютно черного тела R_T^0 :

$$R_T^0 = \sigma T^4, \quad (9)$$

где

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4). \quad (10)$$

Выражение (9) известно под названием закона Стефана-Больцмана: *мощность излучения абсолютно черного тела с единицы поверхности пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.* Этот закон был известен задолго до открытия М. Планка.

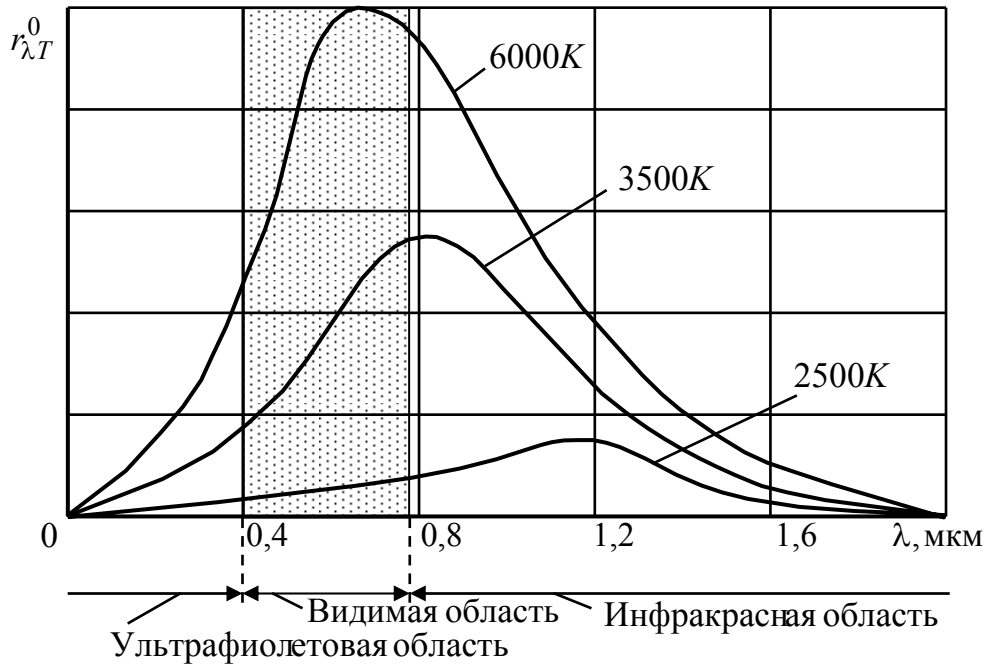


Рис. 1. Зависимость испускательной способности от длины волны

Продифференцировав выражение (8) по λ и приравняв производную $\frac{dr_{\lambda,T}^0}{d\lambda}$ к нулю, можно получить условие максимума функции $r_{\lambda,T}^0$:

$$\lambda_{max} T = b, \quad (11)$$

где

$$b = \frac{hc}{4,965 \cdot k} = 2,90 \text{ мм} \cdot \text{К}. \quad (12)$$

Соотношение (11) между длиной волны λ_{max} , на которую приходится максимум испускательной способности $r_{\lambda,T}^0$, и температу-

рой T называется законом смещения Вина. Этот закон экспериментально был установлен также до получения М. Планком формулы (8).

При низких температурах и коротких длинах волны ($\lambda T < 2000 \text{ мкм} \cdot \text{К}$) испускательная способность абсолютно черного тела достаточно точно определяется формулой Вина

$$r_{\lambda,T}^0 = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda kT}}. \quad (13)$$

Для характеристики реальных излучателей вводится понятие *коэффициента черноты*.

Спектральный (или монохроматический) *коэффициент черноты* $\varepsilon_{\lambda,T}$ показывает, как различаются значения $r_{\lambda,T}$ реального тела и абсолютно черного $r_{\lambda,T}^0$ при одной и той же длине волны и температуре

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{r_{\lambda,T}}{r_{\lambda,T}^0} \quad \text{или} \quad r_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^0. \quad (14)$$

Интегральный или *просто коэффициент черноты* ε_T показывает, как различаются энергетические светимости реального R_T и абсолютно черного тел R_T^0 при одинаковой температуре

$$\varepsilon_T = \frac{R_T}{R_T^0} \quad \text{или} \quad R_T = \varepsilon_T R_T^0.$$

Очевидно, что ε_T численно равен отношению площадей, ограниченных кривыми $r_{\lambda,T}^0$, $r_{\lambda,T}$ и осью λ

$$\varepsilon_T = \frac{\int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^0 d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^0 d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^0 d\lambda}.$$

Из определений следует, что всегда $\varepsilon_{\lambda,T} \leq 1$ и $\varepsilon_T \leq 1$. Равенство имеет место только для абсолютно черного тела.

Серыми называют тела, у которых $\varepsilon_{\lambda,T}$ и ε_T не зависят от температуры, а $\varepsilon_{\lambda,T}$ не зависит и от длины волны. Это некоторые идеали-

зированные тела, спектр излучения которых подобен спектру абсолютно черного тела.

Реальные тела только с определенным приближением могут рассматриваться как серые, так как у них $\varepsilon_{\lambda,T} = \varphi(\lambda, T)$ и $\varepsilon_T = \varphi(T)$.

Из сравнения выражений (7) и (14) следует, что поглощательная способность $\alpha_{\lambda,T}$ и спектральный коэффициент черноты $\varepsilon_{\lambda,T}$ численно равны друг другу

$$\alpha_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T}. \quad (15)$$

Использование законов излучения в оптической пирометрии

Тепловое излучение широко используется для исследования свойств и измерения температуры излучающих тел. Методы этих исследований основаны на зависимости от температуры спектральных и интегральных энергетических параметров тел. Исследования проводятся путем сравнения характеристик реального и абсолютно черного тела по принципу равенства либо энергетических светимостей R_T и R_T^0 , либо испускательных способностей $r_{\lambda,T}^0$ и $r_{\lambda,T}$, либо по идентичности спектрального состава излучения.

Область измерительной техники, в которой температура тела определяется по его тепловому излучению, называется оптической пирометрией. В оптической пирометрии используют понятия радиационной, яркостной и цветовой температур.

Радиационной температурой T_p тела называют температуру абсолютно черного тела, при которой его энергетическая светимость R_T^0 одинакова с энергетической светимостью R_T реального исследуемого тела при его истинной температуре T , т. е. $R_T^0(T_p) = R_T(T)$.

Яркостной температурой тела T_{λ} называют температуру абсолютно черного тела, при которой его яркость $b_{\lambda,T_{\lambda}}^0$ при определенной длине волны λ равна яркости исследуемого тела $b_{\lambda,T}$ при той же длине волны, т. е.

$$b_{\lambda,T_{\lambda}}^0 = b_{\lambda,T}. \quad (16)$$

Из (16) с помощью формулы Планка (8) можно найти связь между истинной T и яркостной $T_{\text{я}}$ температурами тела:

$$T = \frac{c_2}{\lambda} \frac{1}{\ln \left[1 + \varepsilon_{\lambda, T} \left(e^{c_2 / \lambda T_{\text{я}}} - 1 \right) \right]}, \quad (17)$$

где $c_2 = \frac{ch}{k} = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Таким образом, для определения истинной температуры тела по измеренной яркостной необходимо знать его спектральный коэффициент черноты $\varepsilon_{\lambda, T}$ и длину волны λ излучения, при которой производится измерение.

Обычно измерения $T_{\text{я}}$ производятся в видимой области спектра для тел, нагретых до температуры свечения. В этой области с высокой точностью справедлива формула Вина (13), используя которую можно получить более простое соотношение между T и $T_{\text{я}}$;

$$T = \frac{T_{\text{я}}}{1 + \frac{\lambda T_{\text{я}}}{c_2} \ln \varepsilon_{\lambda, T}}. \quad (18)$$

Измерение цветовой температуры основано на зависимости распределения энергии в спектре излучения от температуры тела. В видимой части спектра такое перераспределение приводит к изменению цвета излучающего тела.

Цветовой температурой тела обычно называют такую температуру абсолютно черного тела, при которой отношение испускательных способностей $r_{\lambda, T}$ при двух длинах волн λ_1 и λ_2 у черного и не-черного тел одинаково.

Принцип действия яркостного пирометра

Яркостную температуру можно определить пирометром с исчезающей нитью. Этот прибор позволяет рассматривать в свете определенной длины волны (обычно красный свет с $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$) нить фотометрической лампы пирометра на фоне изображения светящегося исследуемого тела. Изменяя с помощью реостата ток в цепи питания лампы, яркость накала ее нити устанавливается равной яркости

исследуемого тела, и изображение нити исчезает на фоне тела (рис. 2).



Рис. 2. Измерение температуры яркостным пирометром:
а – яркость нити лампы меньше яркости тела; б – яркость нити лампы больше яркости тела; в – яркости нити лампы и тела равны

Если измерительный прибор в цепи питания нити будет заранее отградуирован по излучению абсолютно черного тела, то прибор покажет яркостную температуру. Переход к истинной осуществляется по формуле (18). Так как $\varepsilon_{\lambda, T} < 1$, то очевидно $T_{я} < T$. Как указывалось ранее, яркость принимаемого излучения не зависит от расстояния до источника. Поэтому при измерении температуры яркостным пирометром расстояние между телом и пирометром никакой роли не играет.

Общий вид яркостного пирометра представлен на рис. 3.

В корпусе пирометра соосно расположены трубки (тубусы), в которых смонтированы объектив и окуляр. Между объективом и окуляром расположена фотометрическая лампа. Тубусы можно плавно перемещать вдоль оси для получения резкого изображения нити фотометрической лампы и раскаленного тела, температуру которого нужно измерить.

На передней части корпуса пирометра расположена головка винта с помощью которого можно вводить фильтр, ослабляющий излучение светящегося тела.

На задней поверхности корпуса имеется окно, в котором видны шкалы для отсчета измеренной температуры.

Там же смонтировано кольцо реостата, с помощью которого изменяют яркость свечения нити фотометрической лампы. На тубусе окуляра имеется кольцо, с помощью которого вводится красный фильтр.

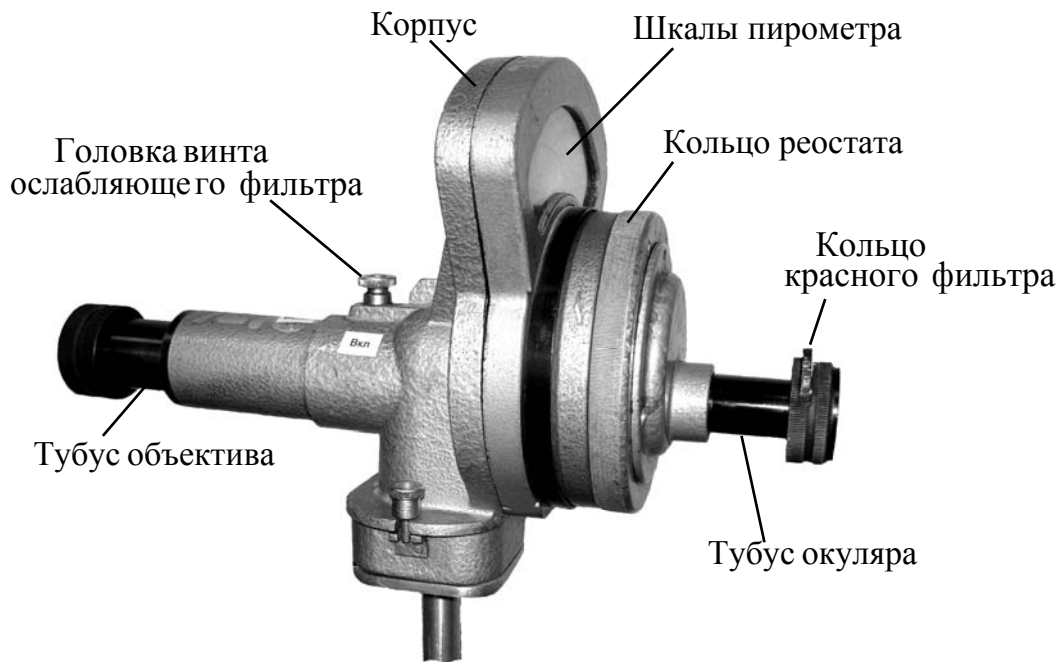


Рис. 3. Общий вид яркостного пирометра

Принципиальная оптическая и электрическая схемы пирометра показаны на рис. 4.

На ней видна оптическая система, состоящая из объектива, окуляра, фотометрической лампы и монохроматического (красного) фильтра. Внутри фотометрической лампы расположена нить, которая рассматривается через окуляр в лучах красного света на фоне изображения раскаленного тела, температуру которого надо измерить (рис. 2).

Фотометрическая лампа с дугообразной нитью накаливания, включена в электрическую схему последовательно с источником питания и реостатом для регулирования тока накала нити лампы.

Вольтметр, встроенный в корпус пирометра, включен параллельно лампе и измеряет падение напряжения на фотометрической лампе. Падение напряжения изменяется в зависимости от тока накала лампы, а следовательно, и от ее температуры. При равенстве яркостей нагретого тела и нити яркостная температура нити равна яркостной температуре накаливаемого тела. При этом нить перестает быть видимой и исчезает на фоне изображения тела (рис. 2).

Пирометр имеет две шкалы, градуированные в °С. По первой шкале можно определить температуру от 800 до 1400°С, по второй – от 1200 до 2000°С.

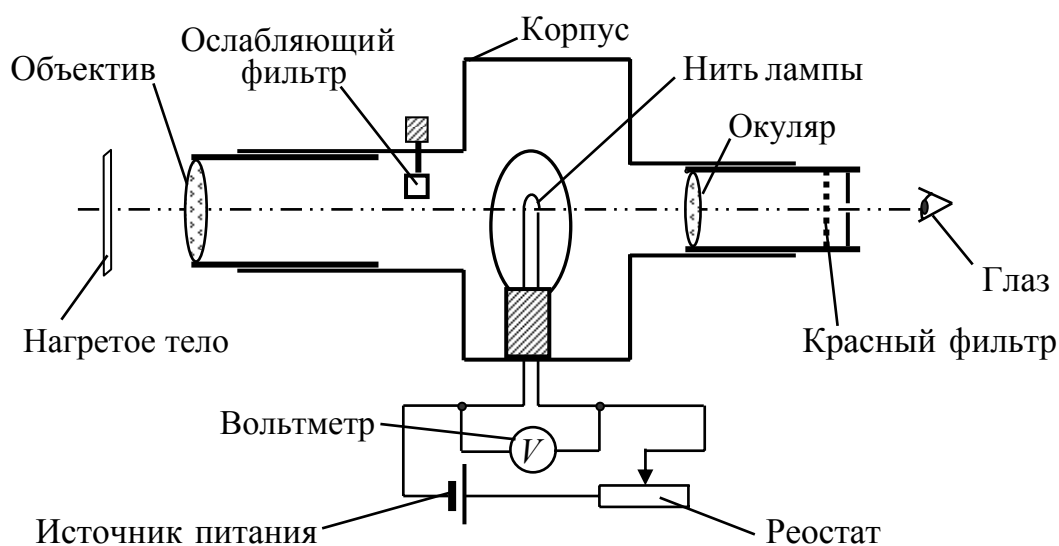


Рис. 4. Принципиальная оптическая и электрическая схемы яркостного пирометра

При измерении температуры тела свыше 1400°C необходимо ослабить яркость излучения тела так, чтобы она не превосходила яркости, соответствующей 1400°C . Это ослабление яркости достигается введением на пути лучей между телом и лампой ослабляющего фильтра, поглощающего часть излучения тела. При введенном фильтре отсчет производят по второй шкале $1200\text{--}2000^{\circ}\text{C}$. Фильтр вводится поворотом головки винта, расположенного на передней части корпуса. При этом белая черта на головке винта должна быть в положении «Вкл».

Фотометрическая лампа пирометра проградуирована по излучению абсолютно черного тела. Прибор показывает действительную температуру только тогда, когда условия излучения накаливаемого тела достаточно близки к условиям излучения абсолютно черного тела. При остальных условиях пирометр измеряет температуру $T_{\text{я}}$, меньшую истинной T .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Общий вид установки показан на рис. 5, а ее принципиальная электрическая схема изображена на рис. 6.

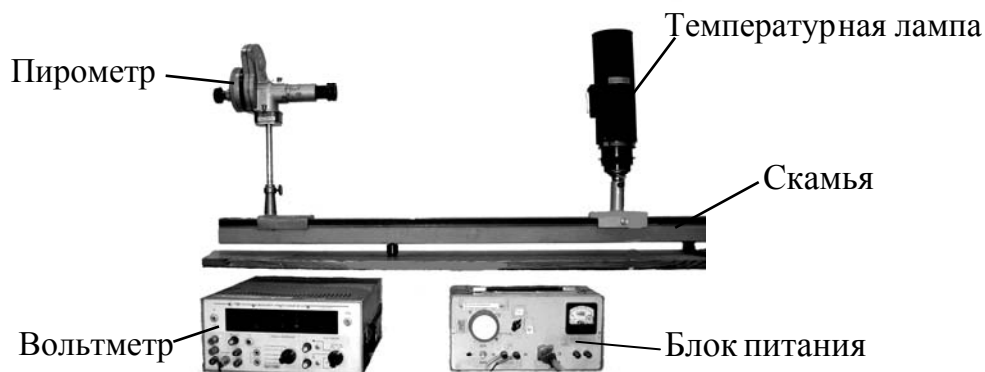


Рис. 5. Общий вид установки

На оптической скамье установлены оптический яркостный пирометр и на расстоянии 0,8–1 м от него температурная лампа. Блок питания температурной лампы и яркостного пирометра расположен на лабораторном столе. Для измерений электрических величин используется цифровой вольтметр.

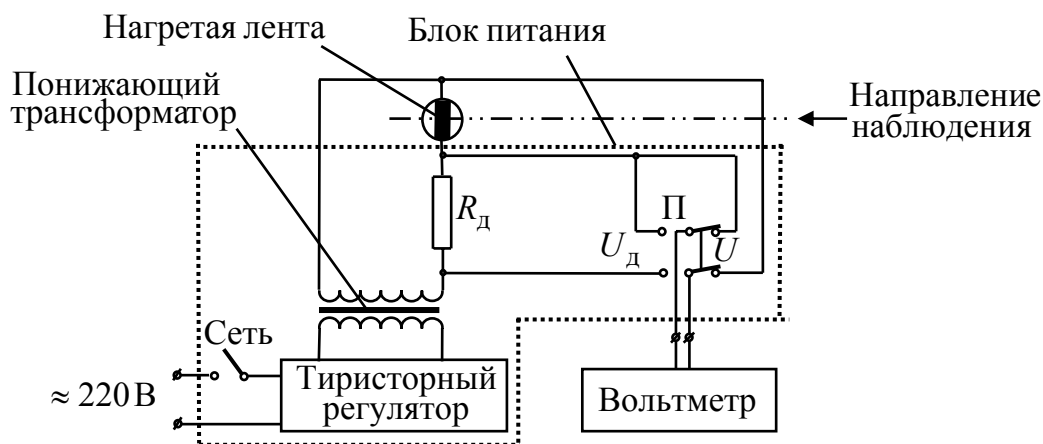


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема установки

Обоснование метода измерения

Объектом исследования являются вольфрамовая лента температурной лампы. Температура ленты измеряется оптическим яркостным пирометром при различных значениях подводимой мощности P . В установившемся состоянии эта мощность равна энергии, рассеиваемой в

единицу времени с поверхности ленты в окружающую среду. Поэтому, используя закон Стефана-Больцмана (9), можно записать:

$$P = \varepsilon_T \sigma S (T^4 - T_{\text{ср}}^4), \quad (19)$$

где ε_T – интегральный коэффициент черноты ленты; S – площадь излучающей поверхности ленты; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды (стеклянного баллона лампы).

Второе слагаемое в правой части (19) учитывает излучение среды (баллона), поглощаемое лентой. Учитывая, что при $T > 1000$ К и $T_{\text{ср}} \approx 330$ К, $T_{\text{ср}}^4 \ll T^4$, этим слагаемым можно пренебречь и тогда

$$P = \varepsilon_T \sigma S T^4. \quad (20)$$

Выделяемая в ленте мощность ленц-джоулева тепла определяется по силе тока I и напряжению $U_{\text{л}}$. Измерение этих величин осуществляется цифровым вольтметром, причем сила тока I определяется путем измерения напряжения $U_{\text{д}}$ на добавочном известном сопротивлении $R_{\text{д}}$ по формуле:

$$I = \frac{U_{\text{д}}}{R_{\text{д}}}.$$

Так как в рассматриваемой установке измеряется напряжение U на ленте лампы и подводящих проводах, причем $U_{\text{л}} = \frac{1}{4}U$, в формулу для P должна быть введена соответствующая поправка. Тогда получаем:

$$P = IU_{\text{л}} = \frac{1}{4} \frac{UU_{\text{д}}}{R_{\text{д}}}. \quad (21)$$

Подключение цифрового вольтметра производится с помощью переключателя «П» на блоке питания. Значение $R_{\text{д}}$ указано на корпусе блока питания.

Температура нити определяется яркостным пирометром в красном свете при длине волны $\lambda = 0,65 \pm 0,01$ мкм. Переход от измеренной яркостной температуры $T_{\text{я}}$ к истинной T производится по формуле (18):

$$T = \frac{T_{\text{я}}}{1 + \frac{\lambda T_{\text{я}}}{c_2} \ln \varepsilon_{\lambda, T}},$$

где $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$. Значения спектрального коэффициента черноты вольфрама необходимо рассчитать по формуле

$$\varepsilon_{\lambda, T} = 0,455 - 2,3 \cdot 10^{-5} (T_{\text{я}} - 1000). \quad (22)$$

Если зависимость (20) построить в логарифмическом масштабе, то по этому графику можно определить показатель степени n в законе Стефана-Больцмана. Действительно, прологарифмировав выражение (20), получим

$$\ln P = \ln(\varepsilon_T \sigma S) + n \ln T. \quad (23)$$

Построив по экспериментальным данным зависимость (23), найдем значение n , как тангенс угла наклона этой прямой:

$$n = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln T_2 - \ln T_1}, \quad (24)$$

где P_1 и P_2 – значения рассеиваемой лентой мощности при соответствующих истинных температурах T_1 и T_2 .

Вид зависимости показан на рис. 7. Правила построения и обработки графиков см. в прил. 2.

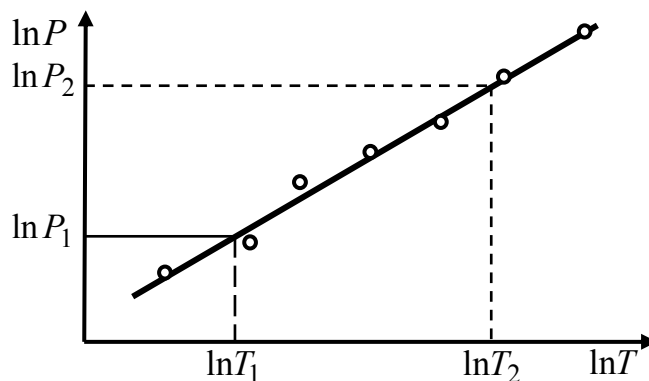


Рис. 7. График зависимости $\ln P = f(\ln T)$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверить наличие всех элементов лабораторной установки в соответствии с рис. 5.

2. На цифровом вольтметре (рис. 8) установить:

- рукоятку «Предел измерения» в положение «10 В»;
- рукоятку «Род работы» – в положение «НЧ»;
- тумблер «Режим работы» в положение «Авт» (верхнее положение). Тем самым обеспечивается измерение сигнала с заданной частотой. Время между двумя последующими выводами на табло измеряемого сигнала устанавливается рукояткой «Время индикации»;
- тумблер «Сеть» в положение «Вкл» (верхнее положение).

Если на вольтметре правильно выставлен ноль, то на табло высвечиваются нули – «0». В противном случае могут высвечиваться любые цифры. Для получения правильных результатов измерения необходимо провести установку нуля на вольтметре.

Внимание! Установка нуля производится преподавателем или лаборантом.



Рис.

8. Цифровой вольтметр

3. На блоке питания (рис. 9) включить тумблер «Сеть». При этом подается питание на оптический пирометр. Установить переключатель «П» в положение «U».

Дополнительно: только на первом столе включить блок питания пирометра.



Рис. 9. Блок питания лампы и пирометра

4. Подготовить к работе яркостный пирометр (рис. 3.) Для этого выполнить следующее:

- ♦ убедиться, что ослабляющий фильтр пирометра не введен; при этом белая указательная черта на головке винта должна быть в положении «Выкл» (рис. 3);
- ♦ убедиться, что красный фильтр, расположенный на тубусе окуляра, не введен; белые метки на кольце фильтра и окуляра должны быть смещены относительно друг друга;
- ♦ установить по первой шкале пирометра температуру около 1000°C , вращая кольцо реостата пирометра;
- ♦ получить четкое изображение светящейся нити фотометрической лампы пирометра, перемещая тубус окуляра; **в дальнейшем тубус окуляра не перемещать;**
- ♦ включить тиристорный регулятор, коснувшись пальцем центра рукоятки «Регулятор напряжения» (рис. 9); вращая рукоятку, установить по вольтметру блока питания величину начального напряжения трансформатора $U_{\text{тр, нач}}$, указанную на установке; при этом лента температурной лампы начнет светиться; значение $U_{\text{тр, нач}}$ записать в первый столбец табл. 3; **в дальнейшем, при проведении измерений, не прикасаться пальцем к центру рукоятки «Регулятор напряжения»**

- ♦ направить пирометр на ленту температурной лампы так, чтобы нить пирометрической лампы располагалась в центре ленты (рис. 2);

- ♦ получить четкое изображение ленты температурной лампы, перемещая тубус объектива пирометра (рис. 3); **в дальнейшем тубус объектива не перемещать**;

- ♦ ввести красный фильтр, расположенный на тубусе окуляра пирометра, для этого совместить белые метки на кольце фильтра и окуляре.

На этом подготовка пирометра к работе заканчивается. Блок питания лампы и пирометра не выключать.

5. Провести измерения температуры ленты и выделяющейся на ней мощности. Для этого выполнить следующее:

- ♦ вращая кольцо реостата пирометра, добиться равенства яркостей нити фотометрической лампы и ленты температурной лампы (рис. 2) и снять показания по первой шкале пирометра; измеренное значение яркостной температуры $t_{я}$ занести в табл. 2;

- ♦ измерить с помощью цифрового вольтметра напряжения U и $U_{д}$ и занести их в табл. 2; для этого на блоке питания (рис. 9) переключатель «П» поставить последовательно в положения « U » и « $U_{д}$ »;

- ♦ если, при измерении, величина сигнала меньше 1 вольта, измерение следует проводить при положении рукоятки вольтметра «Предел измерения» в положение «1 В»;

- ♦ повторить измерения величин $t_{я}$, U и $U_{д}$, увеличивая каждый раз напряжение на трансформаторе на 10 В **до напряжения указанного на стенде! Измерение температуры, после увеличения напряжения, проводить не ранее чем через 2 минуты.**

- ♦ при достижении температуры более 1300 °С измерить величины $t_{я}$, U и $U_{д}$ и записать их в табл. 2; затем включить ослабляющий фильтр (белую указательную черту на головке винта поставить в положение «Вкл»), и не изменяя температуру ленты (не меняя напряжения), повторно измерить температуру $t_{я}$ уже по второй шкале. Измеренное значение $t_{я}$ с включенным фильтром записать в ту же графу табл.2.

Если между измерениями будет расхождение, то в последующие измерения следует вводить поправку.

Например, по первой шкале температура равна $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$, а по второй (с ослабляющим фильтром) – $1310\text{ }^{\circ}\text{C}$. В дальнейшем более высокие температуры следует измерять только по второй шкале пирометра. И все значения температур, которые будут получены по второй шкале, следует увеличивать на $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты измерений занести в табл. 2. Значения $t_{\text{я}}$ следует записывать без учета поправки.

Записать в табл. 2 значение $R_{\text{д}}$, указанное на блоке питания.

Таблица 2

$U_{\text{тр}}$	U	$U_{\text{д}}$	$t_{\text{я}}$	$\varepsilon_{\lambda T}$	$T_{\text{я}}$	T	P	$\ln P$	$\ln T$
В	В	В	$^{\circ}\text{C}$		К	К	Вт		
...									
$R_{\text{д}} = \dots \text{Ом}$									

Внимание! Результаты измерений табл. 2 подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

- ♦ На блоке питания рукоятку «Регулятор напряжения» повернуть против часовой стрелки до упора и выключить тумблер «Сеть».
- ♦ Выключить цифровой вольтметр.
- ♦ Выключить ослабляющий и красный фильтры.

Дополнительно: на первом столе выключить блок питания пирометра.

Обработка результатов измерений

1. Определить поправку для температур, измеренных при включенном ослабляющем фильтре, и записать эти температуры в табл.2 с ее учетом. Выразить измеренную яркостную температуру $t_{\text{я}}$ в кельвинах по формуле: $T_{\text{я}} = 273 + t_{\text{я}}$ и полученные значения занести в табл. 3.

2. Рассчитать значения спектрального коэффициента черноты $\varepsilon_{\lambda T}$ по формуле (22). Рассчитать по формуле (18) истинные температуры T ленты лампы по измеренным яркостным температурам $T_{\text{я}}$.

3. Рассчитать значения $\ln P$ и $\ln T$ и построить график зависимости $\ln P = f(\ln T)$ (рис. 7). Из графика зависимости определить показатель степени n по формуле (24).

Результатом работы является:

Показатель степени n в законе Стефана-Больцмана.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Табл. 2, подписанную преподавателем, проводившим занятие в лаборатории;
2. Пример расчета всех величин $\varepsilon_{\lambda T}$, $T_{\text{я}}$, T , P , $\ln P$, $\ln T$.
3. График зависимости $\ln P = f(\ln T)$.
4. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

Контрольные вопросы

1. Какова природа и особенности теплового излучения?
Литература: [1, п. 1.1]; [2, § 197]; [3, § 1].
2. Что такое спектральная плотность энергетической светимости? Интегральная энергетическая светимость? Размерности этих характеристик и связь между ними?
Литература: [1, п. 1.2]; [2, § 197]; [3, § 2].
3. Что такое испускательная и поглощательная способности тел?
Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 197]; [3, § 2].
4. Что такое абсолютно черное тело? Серое тело?
Литература: [1, п. 1.2]; [2, § 197]; [3, § 2].
5. Основные опытные законы излучения.
Литература: [1, п. 1.3, 1.5, 1.6]; [2, § 198, 199]; [3, § 2, 4].

6. В чем заключается гипотеза Планка? Какой вид имеет формула Планка?

Литература: [1, п. 1.7]; [2, § 200]; [3, § 7].

7. Что такое спектральный коэффициент черноты $\varepsilon_{\lambda T}$ и интегральный коэффициент черноты ε_T ?

Литература: [1, пп. 1.5, 1.8].

8. Что такое радиационная, яркостная, цветовая температуры?

Литература: [1, п. 1.8], [2, § 201].

9. В чем заключается принцип действия яркостного пирометра с исчезающей нитью?

Литература: [1, п. 1.8], [Метод. указ. данной работы].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С., Самолетов В.А., Буравой С.Е.** Физика. Т.3. Электродинамика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006.– 406 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2005. – 542 с.

3. **Савельев И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 13-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2017. – 500 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/91065>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА, ВИНА И ПЛАНКА ПО ИЗЛУЧЕНИЮ НИТИ НАКАЛА ЛАМПЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментально определить значения постоянных Стефана-Больцмана, Вина и Планка; научиться проводить измерения при помощи цифрового вольтметра.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Необходимое оборудование:

- осветитель с лампой накаливания;
- лабораторный автотрансформатор (ЛАТР);
- блок питания лампы;
- вольтметр.

Характеристики средств измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность $\Delta_{\text{и}}$
Вольтметр В7-16	100 В	10 мВ/дел	–	100 мВ
	10 В	1 мВ/дел	–	10 мВ
	1 В	0,1 мВ/дел	–	1 мВ

УКАЗАНИЕ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Поскольку в данной работе используются приборы и устройства, питание которых осуществляется от сети переменного напряжения 220 В, существует опасность поражения электрическим током. Поэтому при выполнении работы необходимо соблюдать следующие меры безопасности.

1. Не разрешается включать установку в отсутствие преподавателя или лаборанта.

2. Запрещается оставлять установку включенной.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Интенсивность теплового излучения характеризуется величиной потока энергии E в единицу времени и измеряется в ваттах (мощность). Мощность излучения с единицы поверхности (плотность потока излучения) по всем длинам волн и направлениям в пределах телесного угла 2π при температуре T называется *энергетической светимостью* R_T . Измеряется в ваттах на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$)

$$R_T = \frac{dE}{dS}. \quad (1)$$

Если в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$ плотность потока излучения составляет $dR_{\lambda,T}$, то величина

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_{\lambda,T}}{d\lambda} \quad (2)$$

характеризует мощность излучения в единичном интервале длин волн при данной длине волн λ и называется *испускательной способностью* тела. Измеряется в ваттах на кубический метр ($\text{Вт}/\text{м}^3$).

Величину R_T иногда называется *интегральной или полной излучательной способностью*, а $r_{\lambda,T}$ – *спектральной или монохроматической излучательной способностью*.

Энергетическая светимость R_T и испускательная способность $r_{\lambda,T}$ зависят от природы тела и его температуры T , а $r_{\lambda,T}$ еще и от длины волны излучения λ . Эти зависимости отмечены в (1) и (2) индексами λ и T .

Очевидно, что

$$R_T = \int_0^{\infty} dR_{\lambda,T} = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (3)$$

Характеристиками теплового излучения тела в заданном по отношению к нормали направлении ϑ в единице телесного угла Ω (стерадиан, ср.) являются энергетическая B_T и спектральная $b_{\lambda,T}$ яркости:

$$B_T = \frac{dR_T}{d\Omega \cos \vartheta}, \quad b_{\lambda,T} = \frac{dr_{\lambda,T}}{d\Omega \cos \vartheta}.$$

Если источник наблюдения является точечным, то чем дальше он находится от места наблюдения, тем меньше энергии от него доходит. Но одновременно уменьшается и телесный угол, под которым виден источник излучения. Количество дошедшей энергии R_T и телесный угол ϑ пропорциональны r^{-2} . Поэтому яркость принимаемого излучения не зависит от расстояния до источника.

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется *поглощательной способностью* $\alpha_{\lambda,T}$, под которой понимается доля поглощенной поверхностью энергии $dE_{\lambda,\alpha}$ в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ от общего количества падающего излучения dE_λ в том же интервале длин волн,

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{dE_{\lambda,\alpha}}{dE_\lambda}. \quad (4)$$

Очевидно, что $\alpha_{\lambda,T}$ зависит от температуры тела и длины волны и не может быть больше единицы. Тело, у которого $\alpha_{\lambda,T} = 1$ для всех длин волн и температур, т.е. которое поглощает всю падающую на него энергию, называется *абсолютно черным телом*. В дальнейшем все обозначения, относящиеся к излучению абсолютно черного тела, будут иметь индекс «0» (например, R_T^0 ; $r_{\lambda,T}^0$; $\alpha_{\lambda,T}^0 = 1$).

Законы теплового излучения

В 1859 г. Кирхгоф установил, что *отношение испускательной $r_{\lambda,T}$ к поглощательной $\alpha_{\lambda,T}$ способности тела не зависит от его природы и является универсальной для всех тел функцией длины волны и температуры:*

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)_3 = \dots = f(\lambda, T). \quad (5)$$

Тело, излучающее больше энергии, будет больше и поглощать, т.е. большей $r_{\lambda,T}$ будет соответствовать и большее значение $\alpha_{\lambda,T}$. Значит, абсолютно черное тело имеет и наибольшую испускательную способность.

Так как у абсолютно черного тела $\alpha_{\lambda,T}^0 = 1$, то

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = \frac{r_{\lambda,T}^0}{1} = r_{\lambda,T}^0 = f(\lambda, T), \quad (6)$$

где $f(\lambda, T)$ – универсальная функция Кирхгофа, которая представляет собой зависимость испускательной способности абсолютно черного тела $r_{\lambda,T}^0$ от λ и T .

Обычно закон Кирхгофа записывается в следующем виде:

$$r_{\lambda,T} = \alpha_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^0. \quad (7)$$

Таким образом, знание вида зависимости $r_{\lambda,T}^0 = f(\lambda, T)$ абсолютно черного тела дает возможность рассчитать излучение любого тела, если известна его поглощательная способность $\alpha_{\lambda,T}$.

В 1900 г. Макс Планк на основании гипотезы о квантовом характере излучения нашел вид функции $f(\lambda, T)$, в точности соответствующий экспериментальным данным.

Аналитическое выражение для испускательной способности абсолютно черного тела имеет вид:

$$r_{\lambda,T}^0 = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}. \quad (8)$$

Эта функция известна под названием формулы Планка. Здесь k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; c – скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $e = 2,7182$ – основание натуральных логарифмов.

На рис. 1 приведена зависимость $r_{\lambda,T}^0$ от длины волны при различных температурах. Видно, что $r_{\lambda,T}^0$ имеет ярко выраженный максимум, положение которого зависит от температуры T . При увеличении температуры T значение $r_{\lambda,T}^0$ увеличивается по всему спектру, а максимум функции смещается в сторону коротких волн.

Если проинтегрировать формулу Планка (8) по всему интервалу длин волн от 0 до ∞ , то в соответствии с (3) получим энергетическую светимость абсолютно черного тела R_T^0 :

$$R_T^0 = \sigma T^4, \quad (9)$$

где

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4). \quad (10)$$

Выражение (9) известно под названием закона Стефана-Больцмана: *мощность излучения абсолютно черного тела с единицы поверхности пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.* Этот закон был известен задолго до открытия М. Планка.

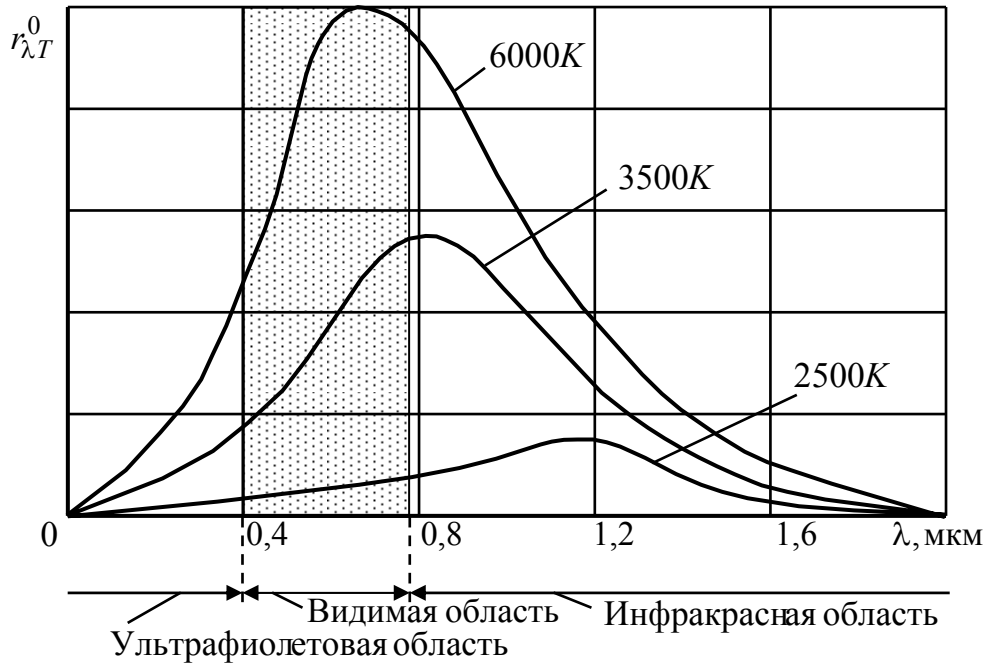


Рис. 1. Зависимость испускательной способности от длины волны

Продифференцировав выражение (8) по λ и приравняв производную $\frac{dr_{\lambda, T}^0}{d\lambda}$ к нулю, можно получить условие максимума функции $r_{\lambda, T}^0$:

$$\lambda_{max} T = b, \quad (11)$$

где

$$b = \frac{hc}{4,965 \cdot k} = 2,90 \text{ мм} \cdot \text{К}. \quad (12)$$

Соотношение (11) между длиной волны λ_{max} , на которую приходится максимум испускательной способности $r_{\lambda, T}^0$, и температу-

рой T называется законом смещения Вина. Этот закон был установлен экспериментально также до получения М. Планком формулы (8).

При низких температурах и коротких длинах волны ($\lambda T < 2000 \text{ мкм} \cdot \text{К}$) испускательная способность абсолютно черного тела достаточно точно определяется формулой Вина

$$r_{\lambda,T}^0 = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda kT}}. \quad (13)$$

Для характеристики реальных излучателей вводится понятие *коэффициента черноты*.

Спектральный (или монохроматический) *коэффициент черноты* $\varepsilon_{\lambda,T}$ показывает, как различаются значения $r_{\lambda,T}$ реального тела и абсолютно черного $r_{\lambda,T}^0$ при одной и той же длине волны и температуре

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{r_{\lambda,T}}{r_{\lambda,T}^0} \quad \text{или} \quad r_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^0. \quad (14)$$

Интегральный или *просто коэффициент черноты* ε_T показывает, как различаются энергетические светимости реального R_T и абсолютно черного тел R_T^0 при одинаковой температуре

$$\varepsilon_T = \frac{R_T}{R_T^0} \quad \text{или} \quad R_T = \varepsilon_T R_T^0.$$

Очевидно, что ε_T численно равен отношению площадей, ограниченных кривыми $r_{\lambda,T}^0$, $r_{\lambda,T}$ и осью λ .

$$\varepsilon_T = \frac{\int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^0 d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^0 d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^0 d\lambda}.$$

Из определений следует, что всегда $\varepsilon_{\lambda,T} \leq 1$ и $\varepsilon_T \leq 1$. Равенство имеет место только для абсолютно черного тела.

Серыми называют тела, у которых $\varepsilon_{\lambda,T}$ и ε_T не зависят от температуры, а $\varepsilon_{\lambda,T}$ не зависит и от длины волны. Это некоторые идеали-

зированные тела, спектр излучения которых подобен спектру абсолютно черного тела.

Реальные тела только с определенным приближением могут рассматриваться как серые, так как у них $\varepsilon_{\lambda,T} = \varphi(\lambda, T)$ и $\varepsilon_T = \varphi(T)$.

Из сравнения выражений (7) и (14) следует, что поглощательная способность $\alpha_{\lambda,T}$ и спектральный коэффициент черноты $\varepsilon_{\lambda,T}$ численно равны друг другу

$$\alpha_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T}. \quad (15)$$

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

На рис. 2. показан общий вид лабораторной установки.

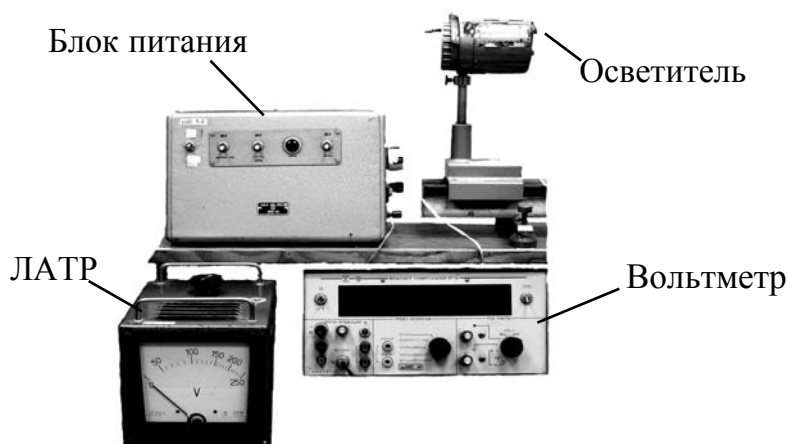


Рис. 2. Общий вид установки

В качестве исследуемого объекта используется вольфрамовая нить вакуумированной лампы накаливания, которая установлена в корпусе осветителя.

В состав установки также входят: лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), предназначенный для изменения напряжения питания лампы; блок питания, который обеспечивает понижение напряжения питания лампы до нужной величины и коммутацию сигналов, измеряемых цифровым вольтметром.

Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 3.

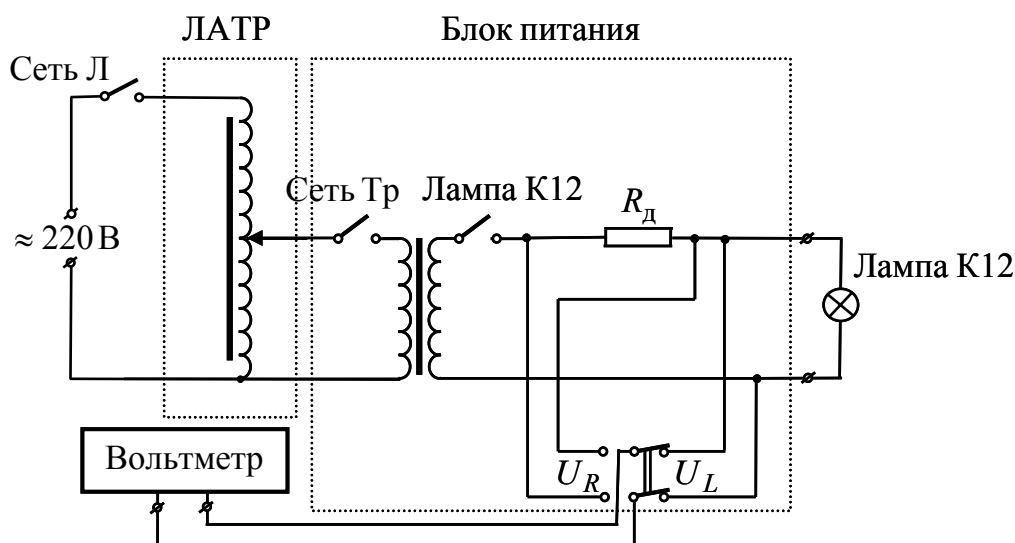


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема установки

Питание от сети с переменным напряжением 220 В через тумблер «Сеть Л» подается на обмотку ЛАТРа. К выходу ЛАТРа подключен сетевой шнур блока питания. При включении тумблера «Сеть Тр» на блоке питания напряжение с выхода ЛАТРа подается на первичную обмотку понижающего трансформатора. После включения тумблера «Лампа К12» со вторичной обмотки трансформатора напряжение подается на лампу накаливания. Цифровой вольтметр подключен к выходным клеммам блока питания.

Для обоснования метода измерения рассмотрим уравнение теплового баланса нити лампы (проводника), разогреваемого током в вакууме.

Выделяющаяся в проводнике мощность P , определяется по силе тока I , протекающего через проводник, и падению напряжения на нем U_L

$$P = IU_L. \quad (16)$$

В установившемся тепловом состоянии вся выделяющаяся в проводнике электрическая мощность будет равна потоку энергии, которая рассеивается в единицу времени с его боковой поверхности. Расчет показывает, что при температуре нити больше 900 К переносом теплоты от проводника в окружающую среду за счет конвекции и теплопроводности элементов крепления нити можно пренебречь. Поэтому, в соответствии с законом Стефана–Больцмана для изотермического участка проводника

$$P = \varepsilon_T \sigma S (T^4 - T_0^4), \quad (17)$$

где ε_T – интегральный коэффициент черноты проводника; σ – постоянная Стефана–Больцмана; S – площадь излучающей поверхности образца, м²; T – температура проводника, К; T_0 – температура окружающей среды, К.

При температуре проводника больше 900 К выполняется условие $T^4 \gg T_0^4$, и выражение (17) с погрешностью менее 2 % можно записать следующим образом

$$P = \varepsilon_T \sigma S T^4. \quad (18)$$

Если известны диаметр и длина проводника, определяющие площадь его излучающей (боковой) поверхности, и интегральный коэффициент черноты материала проводника ε_T , то, измерив электрическую мощность, выделяющуюся в проводнике, и его температуру, можно определить постоянную Стефана–Больцмана σ по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{\varepsilon_T S T^4}. \quad (19)$$

В лабораторной установке нет амперметра для измерения силы тока I , протекающего через лампу. Вместо измерения силы тока I измеряется падение напряжения U_R на добавочном известном сопротивлении R_d (рис. 3), включенном последовательно с лампой накаливания, а сила тока определяется по закону Ома

$$I = \frac{U_R}{R_d}. \quad (20)$$

Для этого при помощи переключателя « $U_R - U_L$ » вольтметр подключается либо к лампе накаливания (положение U_L), либо – к добавочному сопротивлению R_d (положение U_R).

Температура нити накала на данной установке непосредственно не измеряется. Для ее определения используется температурная зависимость удельного электрического сопротивления проводников $\rho(T)$.

Электрическое сопротивление нити накала определяется по закону Ома

$$R_H = \frac{U_L}{I}. \quad (21)$$

Зная диаметр нити накала $d_{\text{н}}$ и ее длину $\ell_{\text{н}}$, можно вычислить площадь поперечного сечения нити $S_{\text{н}}$ и удельное электрическое сопротивление ρ по следующим формулам:

$$S_{\text{н}} = \frac{\pi d_{\text{н}}^2}{4}, \quad (22)$$

$$\rho = R_{\text{н}} \frac{S_{\text{н}}}{\ell_{\text{н}}} = \frac{U_L}{I} \frac{\pi d_{\text{н}}^2}{4\ell_{\text{н}}}. \quad (23)$$

Значение $R_{\text{д}}$ указаны на установке. Его значение нужно записать в табл. 2.

Зная удельное сопротивление ρ вольфрамовой нити, можно определить ее температуру T по известной температурной зависимости $\rho = \rho(T)$:

$$T(\rho) = 276 + 30,30 \cdot 10^8 \rho, \text{ К.} \quad (24)$$

Таким образом, проведя измерение падения напряжений на нити лампы U_L и на добавочном сопротивлении U_R , зная ε_T нити можно опытным путем по формуле (19) определить постоянную Стефана–Больцмана σ .

Из выражения (10) можно получить формулу для расчета постоянной Планка:

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 \bar{\sigma}}}, \quad (25)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; c – скорость света в вакууме, $c = 3,00 \cdot 10^8$ м/с; $\bar{\sigma}$ – среднее значение постоянной Стефана–Больцмана, определяемое в данной работе.

Постоянная Вина b определяется по формуле, которая следует из выражения (12)

$$b = \sqrt[3]{\frac{1,089 \cdot 10^{-3} \pi^5 c k}{\bar{\sigma}}}. \quad (26)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Включение установки

1. Убедиться, что установка для проведения измерений собрана согласно принципиальной схеме, представленной на рис 2.

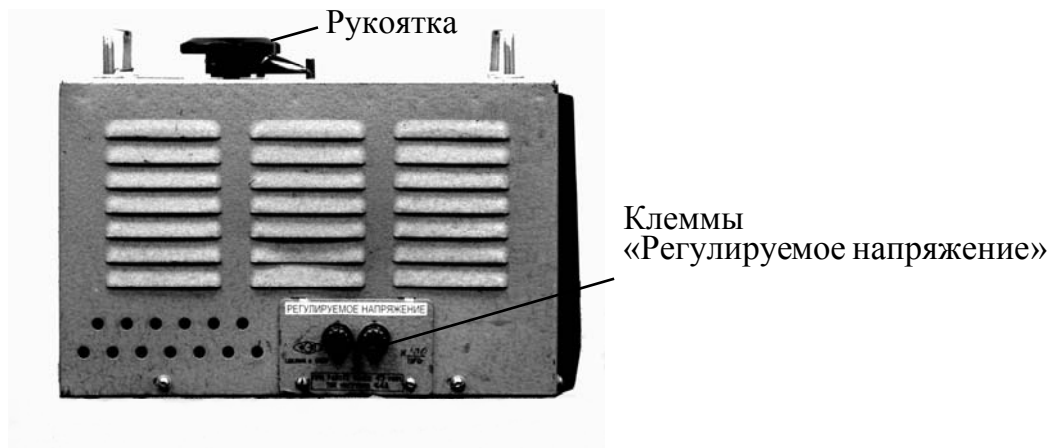


Рис. 4. Лабораторный автотрансформатор (ЛАТР)

2. Убедиться, что сетевой шнур блока питания подключен к клеммам «Регулируемое напряжение» ЛАТРа (рис. 4).

3. Убедиться, что сетевой шнур осветителя (рис. 2) подключен к разъему «Лампа К12» блока питания (рис. 7).

4. Убедиться, что «Вход» цифрового вольтметра (рис. 5) соединен с клеммами блока питания « $\ominus \rightarrow$ » (рис. 7).



Рис. 5. Цифровой вольтметр

5. Повернуть рукоятку ЛАТРа против часовой стрелки в крайнее положение (рис. 4), чтобы на клеммах «Регулируемое напряжение» ЛАТРа отсутствовало напряжение. На ЛАТРе включить тумблер «Сеть Л».

6. Установить на цифровом вольтметре (рис. 5):

- рукоятку «Предел измерения» в положение «10 В»;
- рукоятку «Род работы» – в положение «НЧ»;
- тумблер «Режим работы» в положение «Авт» (верхнее положение). Тем самым обеспечивается вывод на табло вольтметра измеряемого сигнала с заданной частотой. Время между двумя последующими выводами измеряемого сигнала устанавливается рукояткой «Вр. инд» (время индикации) и увеличивается при ее повороте по часовой стрелке;

- тумблер «Сеть» в положении «Вкл.» (верхнее положение).

7. Установить на блоке питания (рис. 6):

- тумблеры «Сеть Тр» и «Лампа К12» в положение «Вкл» (верхнее положение);

- переключатель « $U_R - U_L$ » в положение « U_L ».



Рис. 6. Панель управления блока питания

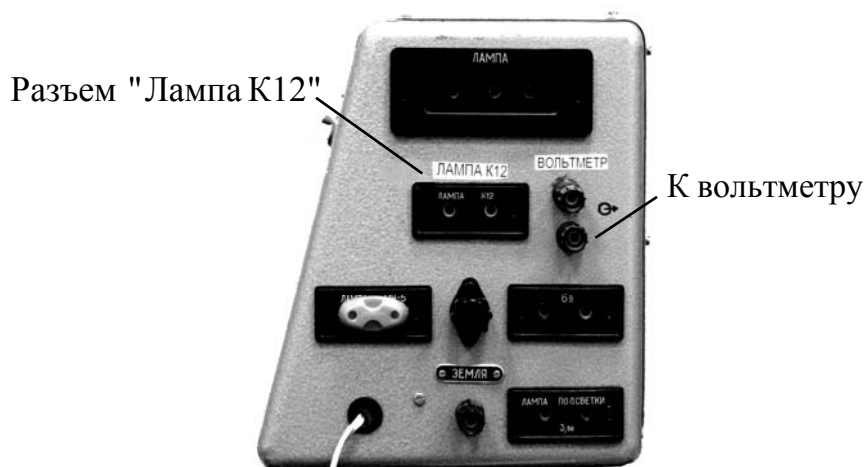


Рис. 7. Панель подключений блока питания

При включении вольтметра должны загореться лампы на его табло (рис. 8). В первом (крайнее левое) знакоместе на табло должен высвечиваться знак «~» переменного напряжения. Если на вольтметре правильно выставлен ноль, то со второй по пятую позицию на табло высвечиваются – «0». В противном случае в третьей, четвертой и пятой позициях табло могут высвечиваться любые цифры (рис. 8). Для получения правильных результатов измерения необходимо провести установку нуля на вольтметре.

Внимание! Установка нуля производится преподавателем или лаборантом.

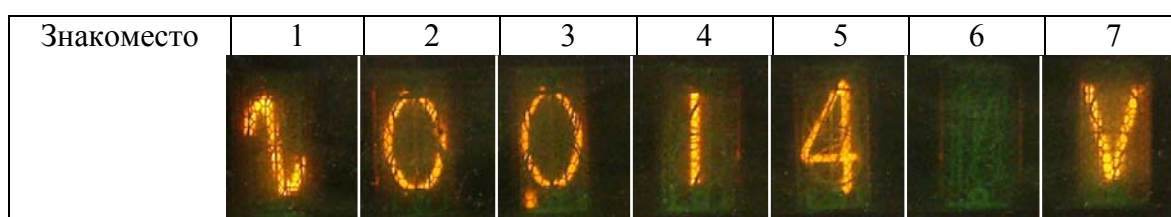


Рис. 8. Табло вольтметра

В шестом и седьмом знакоместе указывается единица измерения исследуемой величины. При установке рукоятки «Предел измерения» в положение «10 В», в седьмом знакоместе должен гореть символ «V», а запятая стоять после второго знакоместа (рис. 8).

8. Поворачивая рукоятку ЛАТРа из крайнего положения по часовой стрелке, визуально убедиться, что увеличиваются накал лампы и показания цифрового вольтметра.

9. Вернуть рукоятку ЛАТРа в крайнее левое положение (против часовой стрелки).

Порядок измерений

1. По цифровому вольтметру установить с помощью ЛАТРа начальное напряжение на лампе U_L около 2 В (в пределах 1,9 – 2,1 В).

Вольтметр ЛАТРа использовать нельзя, так как он показывает напряжение на его выходных клеммах.

2. Подождать 0,5...1 минуту для достижения установившегося теплового состояния в осветителе и записать показания вольтметра U_L в соответствующий столбец табл. 2.

3. Установить переключатель « $U_R - U_L$ » на блоке питания в положении « U_R » (рис. 6), при этом вольтметр будет подключен к добавочному сопротивлению R_d (рис. 2).

4. Рукоятку на цифровом вольтметре «Предел измерения» установить в положение «1 В». В шестом и седьмом знаке вольтметра появится символ « mV », а запятая будет стоять после четвертого знака (рис. 8).

Измерить напряжение на добавочном сопротивлении U_R , и занести его в соответствующий столбец табл. 2.

Измеренное в mV значение U_R в табл. 2 должно быть выражено в вольтах.

Таблица 2

№ п/п	U_L ,	U_R ,	I	W ,	ρ ,	T ,	ε_T ,	σ ,	λ_{\max} ,
	В	В	А	Вт	Ом·м	К	0,5	Вт/(м ² ·К ⁴)	мкм
1									
2									
...									
9									
Исходные данные: $R_d =$ Ом; $d_H = 0,09 \cdot 10^{-3}$ м; $\ell_H = 60,5 \cdot 10^{-3}$ м; $S = 22 \cdot 10^{-6}$ м ²									

Внимание! Результаты измерений табл. 2 подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

5. Вернуть на цифровом вольтметре рукоятку «Предел измерения» в положение «10 В», а переключатель « $U_R - U_L$ » на блоке питания в положении « U_L ».

6. Увеличить с помощью автотрансформатора напряжение на лампе U_L приблизительно на 1,0 В (в пределах 0,9...1,1 В).

7. Повторить действия по пп. 2 – 6, до достижения напряжения на лампе $U_L \approx 10$ В.

Выключение установки

1. Повернуть рукоятку ЛАТРа против часовой стрелки в крайнее левое положение, выключить тумблер «Сеть Л».
2. Выключить тумблер «Лампа К12», а затем тумблер «Сеть Тр» на блоке питания.
3. Выключить тумблер «Сеть» цифрового вольтметра.

Обработка результатов измерений

1. Вычислить по формулам (20) и (16) ток I и выделяющуюся в лампе мощность P .
2. Рассчитать по формуле (21) электрическое сопротивление нити лампы $R_{\text{н}}$.
3. Определить по формуле (23) удельное электрическое сопротивление ρ вольфрама.
4. По удельному электрическому сопротивлению ρ вольфрама определить температуру нити лампы T с помощью формулы (24). Результаты занести в табл. 2.
5. Рассчитать по формуле (19) значение постоянной Стефана–Больцмана σ .
Учитывая, что излучающее тело в лампе имеет вид спирали для расчетов по формуле (19) принять эффективный коэффициент черноты спирали $\varepsilon_T = 0,5$, а размер ее излучающей поверхности $S = 22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.
6. Рассчитать среднее значение постоянной Стефана–Больцмана $\bar{\sigma}$ по данным табл. 2.
7. Рассчитать по формулам (25) и (26) значения постоянных Планка h и Вина b , используя найденное среднее значение постоянной Стефана–Больцмана $\bar{\sigma}$.
8. Результаты расчетов $\bar{\sigma}$, h и b занести в табл. 3.
9. Определить отклонения расчетных значений $\bar{\sigma}$, h и b от справочных в процентах и записать в табл. 3.
10. Используя закон смещения Вина для каждой измеренной температуры T , рассчитать значения λ_{max} по формуле (27) и занести их в табл. 2

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (27)$$

11. Построить график зависимости $\lambda_{\max} = f(T)$.

Таблица 3

Постоянные	Значения постоянных		Абсолютное отклонение от справочных данных	Относительное отклонение от справочных данных, %
	Справочные	Расчетные		
$\sigma, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	$5,67 \cdot 10^{-8}$			
$h, \text{Дж} \cdot \text{с}$	$6,63 \cdot 10^{-34}$			
$b, \text{м} \cdot \text{К}$	$2,90 \cdot 10^{-3}$			

12. Рассчитать абсолютное и относительное отклонения измеренных постоянных по следующим формулам

$$\Delta_x = |x_{\text{экс}} - x_{\text{справ}}|; \quad \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\Delta_x}{x_{\text{справ}}} 100\%,$$

где $x_{\text{экс}}$ - найденные в работе постоянные σ , h и b ;

Результатом работы являются:

1. Расчетные значения постоянных Стефана-Больцмана $\bar{\sigma}$, Вина b и Планка h и результаты сопоставления с их справочными значениями.

2. График зависимости $\lambda_{\max} = f(T)$.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные табл. 2 и 3, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории;
2. Пример расчета всех величин I , W , ρ , T , σ , λ_{\max} ;
3. График зависимости $\lambda_{\max} = f(T)$.
4. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

Контрольные вопросы

1. Какова природа и особенности теплового излучения?

Литература: [1, п. 1.1]; [2, § 197]; [3, § 1].

2. Что такое спектральная плотность энергетической светимости? Интегральная энергетическая светимость. Размерности этих характеристик и связь между ними?

Литература: [1, п. 1.2]; [2, § 197]; [3, § 2].

3. Что такое излучательная и поглощательная способности тел?

Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 197]; [3, § 2].

4. Что такое абсолютно черное тело? Серое тело?

Литература: [1, п. 1.2]; [2, § 197]; [3, § 2].

5. Основные опытные законы излучения.

Литература: [1, п. 1.3, 1.5, 1.6]; [2, § 198, 199]; [3, § 2, 4].

6. В чем заключается гипотеза Планка? Какой вид имеет формула Планка?

Литература: [1, п. 1.7]; [2, § 200]; [3, § 7].

7. Построить качественный график зависимости спектральной плотности энергетической светимости для двух температур, отличающихся в два раза, $T_1 = 2T_2$.

Литература: [1, п. 1.6]; [2, § 200]; [3, § 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2005. – 542 с.

3. **Савельев И.В.** Курс общей физики. В 3-х тт. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. 10-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 320 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2040>

ОФОРМЛЕНИЕ ПРОТОКОЛА И ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

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: Рисунок: Расчетные формулы:	Таблицы с экспериментальными данными 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 неллинейным (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

$t, \text{с}$	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.

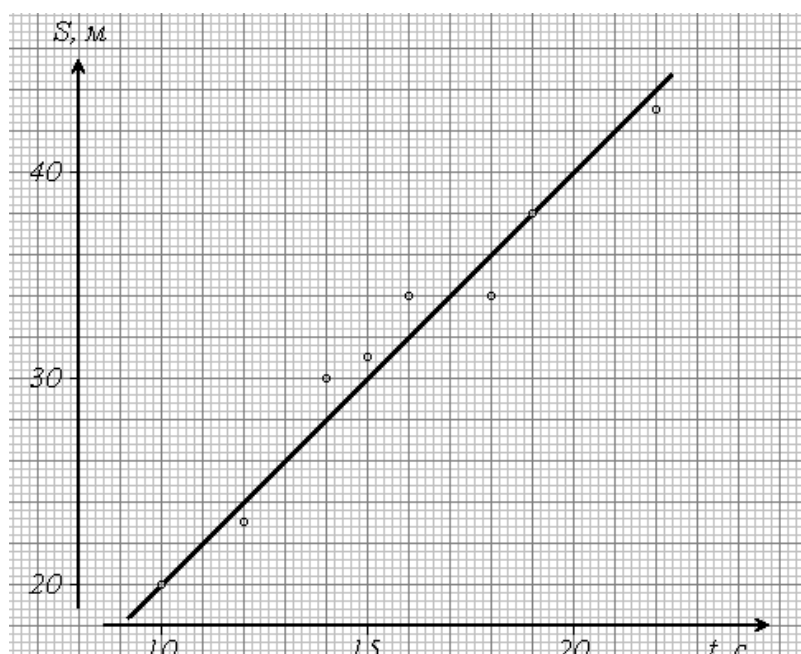


Рис. П.2

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

$$y = a x + b.$$

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.

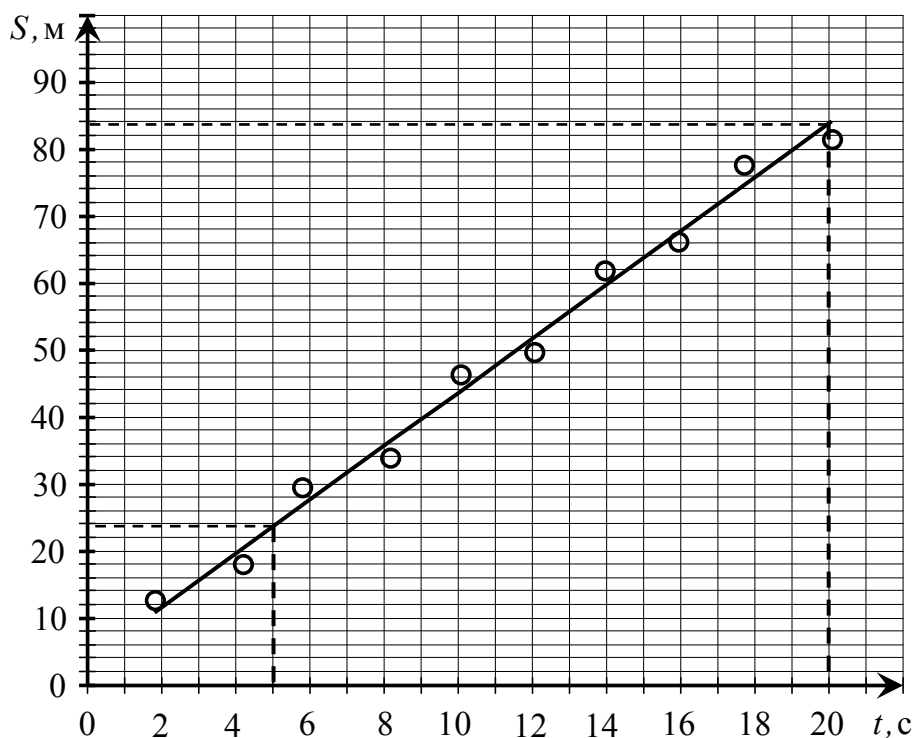


Рис. П.3

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.

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

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Международная система единиц СИ

Метр – единица длины, равная расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за $1/299792458$ доли секунды.

Килограмм – единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.

Секунда – единица времени, равная 9192631770 периодам излучения, соответствующего перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Ампер – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Кельвин – единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль – единица количества вещества, равная количеству вещества системы, в которой содержится столько же структурных элементов (атомов, молекул, ионов, электронов и других частиц или специфицированных групп частиц), сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

Кандела – единица силы света, равная силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частоты $540 \cdot 10^{12}$ Гц (540 ТГц), сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Таблица П.2

Физическая величина	Единица измерения		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
<i>Основные единицы</i>			
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Сила электрического тока	ампер	А	A
Термодинамическая температура	кельвин	К	K
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>Некоторые производные единицы</i>			
Волновое число	метр в минус первой степени	м^{-1}	m^{-1}
Давление	паскаль	Па	Pa
Импульс	килограмм-метр	кг·м/с	kg·m/s
Импульс силы	ньютон-секунда	Н·с	N·s
Коэффициент затухания	секунда в минус первой	с^{-1}	s^{-1}
Коэффициент ослабления	метр в минус первой степени	м^{-1}	m^{-1}
Модуль продольной	паскаль	Па	Pa
Модуль сдвига	паскаль	Па	Pa
Момент импульса	килограмм-метр	кг·м ² /с	kg·m ² /s
Площадь	квадратный метр	м ²	m ²
Объем, вместимость	кубический метр	м ³	m ³
Плотность	килограмм	кг/м ³	kg/m ³

Физическая величина	Единица измерения		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
Скорость	метр в секунду	м/с	m/s
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с	rad/s
Ускорение	метр на секунду	м/с ²	m/s ²
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	рад/с ²	rad/s ²
Частота вращения	секунда в минус первой степени	с ⁻¹	s ⁻¹
Частота периодического процесса	герц	Гц	Hz
Период	секунда	с	s
Сила	ньютон	Н	N
Работа	джоуль	Дж	J
Мощность	ватт	Вт	W
Энергия	джоуль	Дж	J
Световой поток	люмен	лм	lm
Освещенность	люкс	лк	lx
Светимость	люмен на квадратный	лм/м ²	lm/m ²
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м ²	cd/m ²
Поток излучения	ватт	Вт	W
Энергетическая освещен- ность и светимость	ватт на квадратный метр	Вт/м ²	W/m ²
Энергетическая яркость	ватт на стерадианквад- ратный метр	Вт/(ср · м ²)	W/(sr · m ²)
Спектральная плотность энергетической светимо- сти (испускательная спо- собность)	ватт на метр в кубе	Вт/м ³	W/m ³

ДЕСЯТИЧНЫЕ КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

Таблица П.3

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 П.4

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
миллимикрофарад
ммкФ

3. Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку или её 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 П.5

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
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

Введение	3
Лабораторная работа № 4.1. Ознакомление с работой монохроматора и его применение для исследования спектров веществ.	4
Лабораторная работа № 5.1. Определение показателя степени в законе Стефана-Больцмана.	16
Лабораторная работа № 5.2. Определение постоянных Стефана-Больцмана, Вина и Планка по излучению нити накала лампы	36
Приложение 1. Оформление протокола и отчета по лабораторной работе	53
Приложение 2. Правила построения графиков.	54
Приложение 3. Определение наклона прямой на графике	59
Приложение 4. Справочные материалы.	61

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 теплотрии.

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 обеспечивала 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.), до-

цент 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, проведённым 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, проведённых 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 объединением 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 холо-

да. 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.

Баранов Игорь Владимирович
Самолетов Владимир Александрович
Частый Виктор Леонидович

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО КВАНТОВОЙ И АТОМНОЙ ФИЗИКЕ**

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**