

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева»**

Кафедра физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ
СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА**

Методические указания к лабораторной работе № 378
по дисциплине «Физика» для студентов направления 20.03.01
«Техносферная безопасность»
всех форм обучения

Составители В. В. Дырдин
Т. В. Лавряшина
Т. А. Балашова

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 5 от 20.12.2016
Рекомендованы к изданию
учебно-методической комиссией
направления 20.03.01
Протокол № 6 от 29.12.2016
Электронная версия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2017

Лабораторная работа № 378

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА

1. Цель работы: освоение радиационного метода измерения температуры и определение постоянной Стефана – Больцмана.

2. Приборы и принадлежности: источник постоянного напряжения, лабораторный автотрансформатор, понижающий трансформатор, амперметр, вольтметр, излучатель, радиационный пирометр, милливольтметр.

3. Подготовка к работе: ознакомиться с описанием лабораторной работы, прочитав в учебных пособиях [1] §§ 197–199, 201; [2] 35.1–35.3; [3] §§ 1, 2, 4, 7; ответить на вопросы для самоподготовки.

Для выполнения работы студент должен знать:

а) особенности теплового излучения по сравнению с другими видами излучения;

б) физические понятия: световой (тепловой) поток, спектральная плотность энергетической светимости, энергетическая светимость, спектральный коэффициент поглощения;

в) законы теплового излучения: закон Кирхгофа, закон Стефана – Больцмана, закон смещения Вина и их физический смысл; гипотезу Планка.

г) устройство экспериментальной установки и порядок работы на ней;

д) методику обработки экспериментальных данных;

е) расчет погрешностей измерений.

4. Описание экспериментальной установки

В качестве теплового излучателя (рис. 1) в работе используется нагреваемая переменным током тонкая никелевая пластинка 1, включенная в цепь понижающего трансформатора 2. При работе трансформатора в режиме нагрузки, близкой к номинальной, мощность в первичной цепи отличается от мощности во вто-

ричной цепи за счет потерь на нагрев обмоток и перематгничивание сердечника трансформатора (потери на гистерезис). Но для маломощных трансформаторов и невысоких частот этими потерями можно пренебречь.

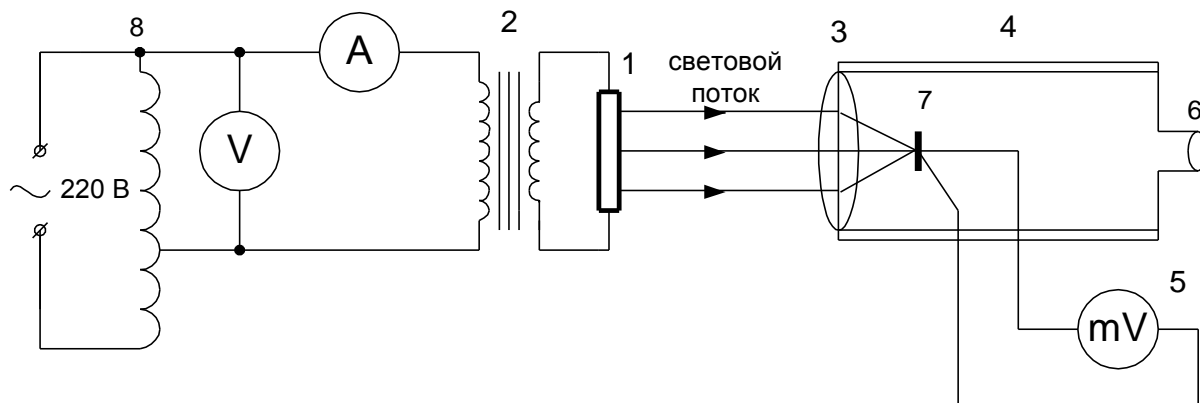


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

- 1 – никелевая пластинка; 2 – трансформатор; 3 – объектив пирометра; 4 – пирометр радиационный;
5 – милливольтметр; 6 – окуляр пирометра; 7 – зачерненная пластина; 8 – лабораторный автотрансформатор*

Излучаемый нагретой пластинкой световой поток Φ_e при помощи окуляра 3 фокусируется на зачерненной пластинке 7 радиационного пирометра 4, служащего для косвенного измерения температуры по показаниям милливольтметра 5 и прилагаемому в работе графику.

5. Методика расчета характеристик излучающей системы

5.1. Определение постоянной Стефана – Больцмана

Световой поток Φ_e , т. е. энергия, излучаемая нагретой пластинкой за время Δt , компенсируется энергией, потребляемой из сети за то же время. Однако не вся потребляемая энергия излучается пластинкой в виде потока излучения, часть ее отводится за счет теплопроводности массивными металлическими держателями пластинки, а также поглощается окружающей средой. Следовательно,

$$\Phi_e \Delta t = \eta UI \Delta t, \quad (1)$$

где U , I – напряжение и сила тока в первичной обмотке трансформатора (рис. 1); η – коэффициент полезного действия установки.

Световой поток Φ_e связан с энергетической светимостью R_e черного тела, определяемой по закону Стефана – Больцмана, соотношением:

$$\frac{\Phi_e}{S} = \sigma T^4,$$

где S – площадь излучающей поверхности пластинки; T – ее термодинамическая температура; σ – постоянная Стефана – Больцмана.

Никелевая пластинка является серым телом, коэффициент поглощения которого $a_T < 1$ и не зависит от длины волны λ . Однако, реальное тело близко по своим свойствам к серому телу лишь в сравнительно небольших интервалах частот. В этом случае энергетическую светимость серого тела записывают в виде

$$R_e = a_T \sigma T^4$$

где $a_T = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda,T} R_{\lambda,T} d\lambda}{\int_0^{\infty} R_{\lambda,T} d\lambda}$ – коэффициент (степень) черноты тела, за-

висящий от его температуры, материала и состояния поверхности; $\alpha_{\lambda,T}$ – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны и температуры. С использованием понятия «степень черноты» поток излучения никелевой пластинки, нагретой до температуры T , запишется в виде

$$\Phi_e = a_T \sigma S T^4. \quad (2)$$

Принимая во внимание, что излучатель находится в воздухе с температурой T_0 , постоянная Стефана – Больцмана из (1) и (2) определится соотношением

$$\sigma = \frac{\eta UI}{a_T S(T^4 - T_0^4)}. \quad (3)$$

5.2. Определение температуры тела радиационным пирометром

Радиационный пирометр используется для бесконтактного определения температуры нагретых тел. При этом методе измерения температуры световой поток от светящейся поверхности тела, нагретого до температуры T , фокусируется (см. рис. 1) на крестообразную зачерненную пластинку 7, изготовленную из платиновой фольги. В пластинке находятся «горячие» спаи последовательно соединенных термопар. «Холодные» спаи термопар, выведенные на внешнюю часть прибора, имеют комнатную температуру. Милливольтметр 5 измеряет термоЭДС в цепи батареи термопар, которая зависит от энергетической светимости R_e исследуемого тела. Если изображение излучающего тела в объективе полностью перекрывает крестообразную пластинку, то энергия, регистрируемая радиационным пирометром, не зависит от расстояния до излучающей поверхности.

Определяемая этим методом радиационная температура T_p отличается от истинной температуры T нагретого серого тела (никелевая пластинка). Истинная температура исследуемого тела рассчитывается с использованием соотношения

$$a_T \sigma T^4 = \sigma T_p^4,$$

из которого

$$T = \frac{T_p}{\sqrt[4]{a_T}}. \quad (4)$$

6. Выполнение работы

6.1. Проведение измерений

6.1.1. Занесите в табл. 1 параметры лабораторной установки: ширину a , толщину b и коэффициент черноты a_T никелевой пластины, коэффициент полезного действия η установки и значение комнатной температуры T_0 .

Таблица 1

Параметры лабораторной установки

a	b	η	a_T	T_0
м	м			К
$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,4	0,85	

6.1.2. Определите цену деления вольтметра и амперметра в цепи лабораторного автотрансформатора 8.

6.1.3. Включите в сеть лабораторный автотрансформатор и, плавно поворачивая его рукоятку, нагрейте никелевую пластинку до видимого свечения. Значения напряжения U и силы тока I (в делениях) занесите в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений и расчета постоянной
Стефана – Больцмана

№	U		I		L	n	T_p	T	S	σ	$\langle \sigma \rangle$
	дел	В	дел	А	м	дел	К	К	м ²	Вт/м ² ·К ⁴	Вт/м ² ·К ⁴
1											
2											
...											
5											

6.1.4. Не касаясь раскаленной поверхности и держателей пластинки, приблизительно измерьте длину L светящейся поверхности пластинки.

6.1.5. По милливольтметру 5, соединенному с пирометром, определите максимальное отклонение указателя прибора в делениях n шкалы.

6.1.6. Повторите пять раз измерения U , I , L , n , изменяя напряжение в первичной обмотке трансформатора.

6.1.7. После проведения измерений необходимо уменьшить U до 0 и выключить установку.

6.1.8. По градуировочному графику $T_p = f(n)$ определите радиационную температуру T_p , а затем по соотношению (4) рассчитайте истинную температуру T светящейся части никелевой пластинки.

6.1.9. Пренебрегая площадью двух торцевых поверхностей, рассчитайте площадь S светящейся части пластинки по уравнению

$$S = 2(a + b)L.$$

6.1.10. Вычислите по соотношению (3) постоянную σ Стефана – Больцмана для каждого измерения и определите ее среднее значение $\langle \sigma \rangle$.

6.1.11. Оцените отклонение экспериментального значения постоянной Стефана-Больцмана $\langle \sigma \rangle$ от ее теоретического значения $\sigma_T = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

$$\varepsilon = \left| \frac{\langle \sigma \rangle - \sigma_T}{\sigma_T} \right| \cdot 100\%.$$

Сделайте вывод.

6.2. Расчет спектральных характеристик нагретого тела

Применяя законы излучения черных тел, определите для полученных значений температуры T нагретой никелевой пластинки следующие спектральные характеристики.

6.2.1. По закону смещения Вина рассчитайте длины волн λ_{\max} , на которые приходится максимальное значение спектральной плотности $r_{\lambda, T}^{\max}$ энергетической светимости для полученных значений температур T .

Из закона смещения Вина следует, что длина волны λ_{\max} , на которую приходится максимальное значение $r_{\lambda, T}^{\max}$ спектральной плотности энергетической светимости черного тела (рис. 2), обратно пропорциональна его термодинамической температуре

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

6.2.2. Рассчитайте максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda, T}^{\max}$ для используемых температур T .

Согласно закону Вина максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}^{\max}$ черного тела пропорционально пятой степени его термодинамической температуры

$$r_{\lambda,T}^{\max} = b_1 T^5,$$

где $b_1 = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$ – постоянная Вина.

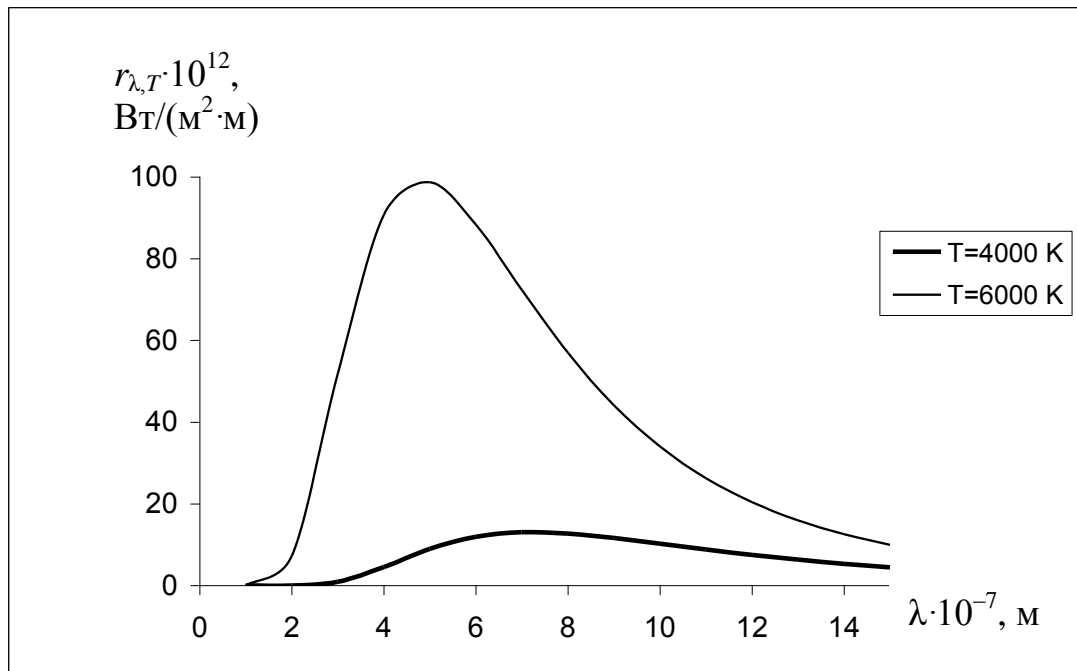


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности энергетической светимости от длины волны

6.2.3. Рассчитайте энергетическую светимость R_e для выбранных температур T никелевой пластинки, используя закон Стефана – Больцмана.

Энергетическая светимость R_e черного тела по закону Стефана – Больцмана пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры

$$R_e = \sigma T^4.$$

Результаты расчетов указанных спектральных характеристик излучения никелевой пластинки занесите в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета спектральных характеристик

№	T	λ_{\max}	$r_{\lambda,T}^{\max}$	R_e
1.	К	м	Вт/м ³	Вт/м ²
2.				
...				
5				

Сделайте вывод.

7. Вопросы для самоподготовки

7.1. Какое излучение называется тепловым? Чем оно отличается от других видов излучения: люминесценции, хемилюминесценции.

7.2. Дайте определение основных характеристик теплового излучения: объемной плотности энергии, потока излучения, спектральной плотности энергетической светимости, энергетической светимости.

7.3. Что определяет коэффициент поглощения $\alpha_{\lambda,T}$? Как с его помощью охарактеризовать черное, серое и цветное тела?

7.4. Сформулируйте закон Кирхгофа. В чем заключается физический смысл универсальной функции Кирхгофа?

7.5. Для каких тел справедливы законы Стефана – Больцмана, закон смещения Вина, закон Вина? Сформулируйте эти законы.

7.6. На графике (см. рис. 2) зависимости $r_{\lambda,T} = r_{\lambda,T}(\lambda)$ покажите энергию, излучаемую единицей поверхности нагретого тела за единицу времени в узком интервале длин волн от λ до $(\lambda + d\lambda)$ и в интервале длин волн от 0 до ∞ .

7.7. На каком физическом принципе основано действие радиационного пирометра?

7.8. Как связаны истинная T и радиационная T_p температуры нагретых тел?

7.9. Что понимают в оптической пирометрии под радиационной, яркостной и цветовой температурой?

8. Список рекомендуемой литературы

8.1. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стереотип. – Москва : Академия, 2007. – 560 с.

8.2. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2007. – 720 с.

8.3. Савельев, И. В. Курс физики : в 3 т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим и технологическим специальностям / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 303 с.

Составители

Валерий Васильевич Дырдин
Таисия Васильевна Лавряшина
Татьяна Александровна Балашова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА

Методические указания к лабораторной работе № 378
для студентов направления подготовки 20.03.01
«Техносферная безопасность», профиль
«Безопасность технологических процессов и производств»
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.02.2017 Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 0,5.
Тираж 24 экз. Заказ.
КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.
Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.