

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

А.В. КОСТАНОВСКИЙ, Ф.Ф. ЦВЕТКОВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ
СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
(калориметрический метод)**

Лабораторная работа № 18

**Методическое пособие
по курсам**

Тепломассообмен

Тепломассообмен в энергетическом оборудовании АЭС

Теоретические основы теплотехники

для студентов, обучающихся по направлениям

«Техническая физика», «Теплоэнергетика»,

«Энергомашиностроение».

УДК

536

К-72

УДК: 536.6 (076.5)

Утверждено учебным управлением МЭИ

Подготовлено на кафедре теоретических основ теплотехники
им. профессора М.П. Вукаловича

Рецензенты: доктор технических наук, проф. Г.П.Плетнев,
канд. техн. наук, доцент В.А. Пронин

Костановский А.В., Цветков Ф.Ф. Определение интегральной полусферической степени черноты твердых тел (калориметрический метод)... Лабораторная работа № 18. Методическое пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 8 с.

Методическое пособие содержит основы калориметрического метода для определения интегральной полусферической степени черноты твердых тел, дано описание лабораторного стенда. Исследуемый образец – тонкая металлическая проволока из вольфрама. Проволока нагревается путем непосредственного пропускания через нее постоянного тока. Приводятся рекомендации по проведению эксперимента, анализу и обработке результатов измерений, оценке их точности и сравнению полученных экспериментальных данных со справочными.

Лабораторная работа предназначена для студентов, обучающихся по направлениям «Техническая физика», «Теплоэнергетика», «Энергомашиностроение».

Учебное издание

Костановский Александр Викторович,
Цветков Федор Федотович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ
СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
(калориметрический метод)

Лабораторная работа № 18

Методическое пособие
по курсам «Тепломассообмен», «Тепломассообмен в энергетическом оборудовании АЭС»,
«Теоретические основы теплотехники»
для студентов, обучающихся по направлениям
«Техническая физика», «Теплоэнергетика», «Энергомашиностроение»

Редактор издательства Е.Н. Касьянова

ЛР № 020528 от 05.06.97

Темплан издания МЭИ 2004 г. (I)

Подписано к печати 21.05.04

Формат 60х84/16 Печать офсетная Физ.печ.л. 0,5 Тираж 1000 Изд.№ 51 Заказ 226т

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная, 14

Типография НИИ «Геодезия», Московская обл. г. Красноармейск, ул. Центральная, д. 16

© Московский энергетический институт, 2004

1. Назначение работы

1. Углубление знаний о процессе переноса энергии излучением - изучение теории лучистого теплообмена, его законов; факторов, влияющих на интенсивность процесса теплового излучения.

2. Ознакомление с методами экспериментального определения степени черноты твердых тел.

3. Освоение калориметрического (экспериментального) и теоретического методов определения интегральной полусферической степени черноты твердых тел. Анализ полученных результатов и их сравнение с литературными данными.

2. Домашняя подготовка к лабораторной работе

1. Определение понятий: поток, плотность потока и интенсивность излучения; поглощательная, отражательная и пропускательная способности; интегральная и спектральная (мономатическая) степень черноты.

2. Закон Стефана—Больцмана.

3. Абсолютно черное тело. Серое тело.

4. Определение различных потоков излучения: собственный, поглощенный, отраженный, эффективный, результирующий.

5. Расчет потока результирующего излучения в замкнутой системе серых тел.

3. Основы определения интегральной степени черноты твердых тел.

(калориметрический и теоретический методы)

Степень черноты является сложной функцией, зависящей от природы излучающего тела, его температуры, состояния поверхности, а для металлов и от степени окисления этой поверхности.

Напомним, что степень черноты твердых тел показывает, какую долю энергии излучения абсолютно черного тела составляет энергия излучения реального тела. В зависимости от ширины спектрального интервала, в котором измеряют мощности теплового излучения вещества и черного тела, различают *спектральную* ϵ_λ (измерения проводят в узкой области спектра) и *интегральную* ϵ_{th} (используют практически весь диапазон длин волн теплового излучения) степень черноты излучения. Спектральную степень черноты ϵ_λ обычно используют для определения истинной температуры тела, а интегральную степень черноты ϵ_{th} для расчета лучистого теплообмена между телами.

Калориметрический метод, являясь абсолютным методом, позволяет в

широкой области температур с высокой точностью измерять интегральную полусферическую степень черноты ε_{th} твердых тел. Действительно, в этом методе лучистый поток определяется непосредственно по измерению количества тепла, отдаваемого телом во всю полусферу окружающего пространства.

Рассмотрим излучающую систему, состоящую из двух длинных серых соосных цилиндров. Для первого (внутреннего) цилиндра плотность потока результирующего излучения равна

$$E_{\text{рез } 1} = \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4) / [1/\varepsilon_1 + (1/\varepsilon_2 - 1) F_1/F_2], \quad (1)$$

где σ_0 - постоянная Стефана - Больцмана ($\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$); ε_1 и ε_2 - интегральные степени черноты внутреннего и внешнего цилиндра соответственно; F_1 и F_2 - площади, а T_1 и T_2 - температуры этих поверхностей.

Допустим, что $F_1 \ll F_2$. Тогда из формулы (1) получим

$$E_{\text{рез } 1} = \varepsilon_1 \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4). \quad (2)$$

Формула (2) служит для определения интегральной полусферической степени черноты твердого тела, которое можно считать серым. Как видно из формулы (2), для определения ε_1 в опыте достаточно определить $E_{\text{рез } 1}$, T_1 и T_2 .

Если тела не серые, что обычно имеет место на практике, то формулы (1) и (2) теряют силу. Однако при выполнении на практике условий $F_1 \ll F_2$ и $T_1^4 \gg T_2^4$, как это вытекает из теории теплообмена излучением в системе не серых тел, формула для $E_{\text{рез } 1}$ совпадает с формулой (2). Следовательно, в этом случае формула (2) может быть использована для экспериментального определения интегральной полусферической степени черноты и не серых тел (например, металлов).

Величина $E_{\text{рез } 1}$ легко находится, в случае, когда (как в данной работе) внутренний цилиндр представляет собой тонкую металлическую проволоку, по которой пропускается электрический ток. Если обозначить через Q_1 электрическую мощность, то плотность потока результирующего излучения $E_{\text{рез } 1}$ равна

$$E_{\text{рез } 1} = - Q_1 / F_1. \quad (3)$$

Таким образом, для экспериментального определения интегральной полусферической степени черноты $\varepsilon_1 = \varepsilon_{th}$ необходимо измерить поток тепла, излучаемый поверхностью исследуемого тела Q_1 , его температуру T_1 и температуру оболочки T_2 .

Расчетная формула имеет вид:

$$\varepsilon_{th} = Q_1 / \sigma_0 F_1 (T_1^4 - T_2^4). \quad (4)$$

Интегральная полусферическая степень черноты ε_{th} чистых металлов с

оптически полированной поверхностью (иногда в литературе ее называют излучательная способность) может быть найдена (при использовании электромагнитной теории Максвелла и закона Кирхгофа) теоретическим методом. Для них (металлов) $\epsilon_{th} = \epsilon^p_{th}$ связана с удельным электрическим сопротивлением и температурой следующей известной зависимостью (формула Девиссона и Уикса):

$$\epsilon^p_{th} = 7,54(r_0 T)^{1/2} - 63,5(r_0 T) + (r_0 T)^{3/2}, \quad (5)$$

где r_0 - удельное электрическое сопротивление, Ом·м; T - температура, К.

Таким образом, для расчета интегральной полусферической степени черноты (излучательной способности) ϵ^p_{th} по формуле (5) необходимо из результатов эксперимента по нагреву исследуемого тела постоянным током определить удельное электрическое сопротивление r_0 и температуру исследуемого тела T_1 .

4. Описание лабораторного стенда

Схема лабораторного стенда для определения интегральной полусферической степени черноты металлов представлена на рисунке. В качестве исследуемого образца использована тонкая вольфрамовая проволока. Проволока впаяна в стеклянный сосуд с двойными стенками, между которыми циркулирует охлаждающая вода. Размеры проволоки (длина и диаметр) указаны на стенде.

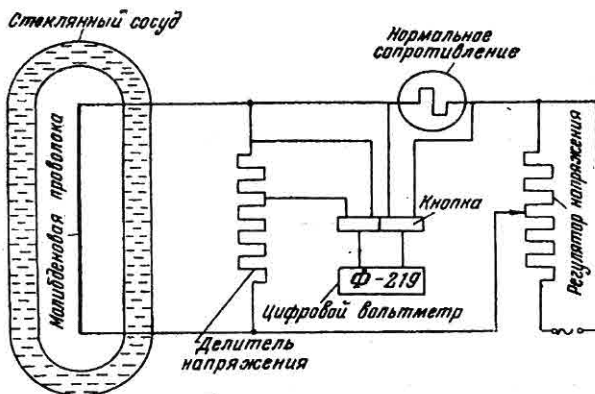


Схема экспериментальной установки

Проволока нагревается путем непосредственного пропускания постоянного электрического тока. Падение напряжения на проволоке

измеряется цифровым вольтметром Ф-219 (класс точности 0,2) через делитель напряжения. Сила тока определяется с помощью того же вольтметра и нормального сопротивления ($R_n = 0,05 \text{ Ом}$).

Температура исследуемой проволоки измеряется по принципу термометра сопротивления. Зависимость электрического сопротивления проволоки от температуры определяется в предварительных опытах. При выполнении лабораторной работы эта зависимость считается известной и указана на стенде.

Температура внутренней поверхности сосуда практически равна температуре охлаждающей воды, которая измеряется термометром или термопарой (обычно T_2 – комнатная температура).

Чтобы исключить влияние конвективного теплообмена, пространство, в котором находится проволока, вакуумировано (остаточное давление воздуха внутри стеклянного сосуда $\sim 0,1 \text{ Па}$).

5. Проведение опытов

Опыты проводятся после предварительного изучения методики проведения эксперимента и устройства экспериментальной установки. Затем включается источник электрического питания и ток подается в цепь исследуемого излучателя (проволоки).

Измерения проводят после достижения установившегося теплового состояния. Это состояние характеризуется постоянством всех измеряемых величин во времени и устанавливается по истечении 8—10 мин после включения опытной установки. В протокол измерений заносятся напряжение на делителе напряжений U_d и напряжение на нормальном сопротивлении U_n .

Необходимо провести 5—6 опытов при различных напряжениях на проволоке. Напряжения подбирать таким образом, чтобы охватить интервал изменения температуры 500 – 1000 К.

6. Обработка результатов измерений

Вариант 1

Определение интегральной полусферической степени черноты вольфрамовой проволоки по формуле (4).

Электрическая мощность Q_1 , Вт определяется по формуле $Q_1 = I \cdot U$.

Электрический ток I , А находится по измеренному напряжению U_n В на нормальном сопротивлении

$$I = U_n / R_n, \quad (6)$$

Напряжение на вольфрамовой проволоке U , В определяется следующим образом:

$$U = U_d \cdot R_{\text{д общ}} / R_{\text{д изм}}, \quad (7)$$

где $R_{\text{д общ}} = 1000 \text{ Ом}$ - общее сопротивление делителя, $R_{\text{д изм}} = 200 \text{ Ом}$ - сопротивление делителя на участке измерения напряжения.

Электрическое сопротивление проволоки R определяется по закону Ома

$$R = U / I. \quad (8)$$

По рассчитанному сопротивлению вольфрамовой проволоки R находится ее температура T_1 (приближенно принимается, что температура поверхности проволоки равна среднему значению температуры по ее поперечному сечению) в данном опыте. Температура T_2 принимается равной температуре воды.

Определив интегральную полусферическую степень черноты вольфрамовой проволоки при различных температурах, строят графическую зависимость $\epsilon_{\text{th}} = f(T_1)$. Экспериментальные результаты необходимо сравнить с литературными значениями (см. Приложение) по интегральной полусферической степени черноты вольфрама.

Погрешность измерения ϵ_{th} определить обычным способом с учетом расчетной формулы и погрешности измерительных приборов.

Вариант 2

Определение интегральной полусферической степени черноты (излучательной способности) вольфрама $\epsilon_{\text{th}}^{\text{p}}$ по теоретической формуле (5)

Удельное электрическое сопротивление r_0 определяют в соответствии с формулой:

$$r_0 = R \cdot S / h, \quad (9)$$

где R – сопротивление вольфрамовой проволоки (см. *Вариант 1*); h – длина проволоки; S – площадь поперечного сечения проволоки.

Определив интегральную полусферическую степень черноты (излучательную способность) вольфрамовой проволоки при различных температурах, строят графическую зависимость $\epsilon_{\text{th}}^{\text{p}} = f(T_1)$.

Экспериментальные результаты необходимо сравнить с литературными значениями (см. Приложение) по интегральной полусферической излучательной способности полированного вольфрама.

Погрешность измерения $\epsilon_{\text{th}}^{\text{p}}$ определить обычным способом с учетом погрешности измерительных приборов.

8. Отчет о работе

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- цель работы, теоретические основы методики проведения эксперимента.
- принципиальную схему опытной установки.
- протокол записи показаний приборов.
- таблицу результатов обработки опытных данных.
- график зависимости коэффициентов теплового излучения исследуемого тела от температуры и аппроксимирующую зависимость.
- оценку погрешностей измерения.

9. Темы контрольных вопросов

1. Физическая сущность процесса теплового излучения.
2. Закон Стефана — Больцмана.
3. Собственное, эффективное, результирующее излучение.
4. Понятие степени черноты.
5. Сущность калориметрического метода.
6. Метод определения лучистого потока и температуры излучающего тела.
7. Меры, позволяющие исключить влияние излучения оболочки.
8. Меры, обеспечивающие исключение теплообмена исследуемого тела с оболочкой путем конвекции и теплопроводности.
9. Характер зависимости коэффициента теплового излучения тел от температуры.

10. Библиографический список

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А.С. Теплопередача. М. Энергоиздат, 1981. 416 с.
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. М.: Издательство МЭИ. 2001. 548 с.
3. Практикум по теплопередаче. Учебное пособие для вузов / А.П. Солодов, Ф.Ф. Цветков, А.В. Елисеев, В.А. Осипова; Под ред. А.П. Солодова. М. Энегтоатомиздат. 1986. 296 с.

11. Приложение

Справочные данные по $\epsilon_{th}^p = \epsilon_{th}^p(T_1)$ для вольфрама.

T, K	400	600	800	1000
ϵ_{th}	0,030	0,060	0,081	0,105