

Работа ТП-11М

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ И КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Цель работы — ознакомление с основными понятиями теории теплообмена излучением; освоение методики экспериментального определения коэффициента излучения и степени черноты твердого тела.

Содержание работы

1. Экспериментальное определение коэффициента излучения и степени черноты твердого тела для трех температурных режимов.
2. Оценка погрешностей результатов измерений.

Основы теории

Нагретые тела излучают электромагнитные волны. Это излучение происходит вследствие преобразования энергии теплового движения частиц тела в энергию излучения.

Полное количество энергии, излучаемой в единицу времени единицей поверхности абсолютно черного тела, имеющего температуру T , К, определяется законом Стефана — Больцмана:

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \quad (11.1)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — константа Стефана-Больцмана; E_0 — интегральная плотность потока полусферического излучения абсолютно черного тела, Вт/м². Таким образом, закон Стефана-Больцмана показывает, что величина E_0 прямо пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры абсолютно черного тела.

В технических расчетах закон Стефана — Больцмана удобно применять в другой форме:

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (11.2)$$

где $c_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана — Больцмана может быть использован и для реальных тел. В этом случае он принимает следующий вид:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = c \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (11.3)$$

Здесь E — интегральная плотность потока полусферического излучения реального тела, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $\varepsilon = E/E_0$ — интегральная степень черноты тела.

Интегральной степенью черноты тела называется соотношение интегральных плотностей потоков полусферических излучений рассматриваемого тела и абсолютно черного тела при одинаковой для обоих тел температуре. Степень черноты реальных тел всегда меньше единицы ($0 < \varepsilon < 1$).

Величина $c = c_0 \varepsilon \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, называется *коэффициентом излучения реального тела*. Коэффициент излучения, так же как и степень черноты, зависит от материала, состояния поверхности и температуры тела.

Тела, для которых спектральная степень черноты ε_λ не зависит от длины волны, называются *серыми телами*; значения интегральной и спектральной степеней черноты этих тел совпадают.

Тепловое взаимодействие тел, разделенных диатермичной (прозрачной) средой и имеющих различные температуры, можно выразить через результирующий поток лучистой энергии, который представляет собой поток теплоты, передаваемый от более нагретого тела к менее нагретому телу.

Значение этого потока зависит от температуры тел, их лучистых характеристик (степени черноты, коэффициента поглощения), площадей поверхности тел и взаимного расположения в пространстве. Для системы двух тел, первое из которых

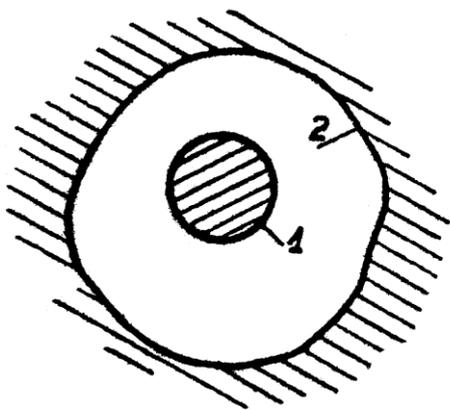


Рис. 11.1. Схема лучистого теплообмена между двумя телами, образующими замкнутую систему: 1 — излучающее тело; 2 — оболочка

находится в полости второго, причем первое тело не самооблучается (тело выпуклое) (рис. 11.1), теплообмен рассчитывают по формуле

$$Q_{1,2} = c_{1,2} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (11.4)$$

где

$$c_{1,2} = \left[\frac{1}{c_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0} \right) \right]^{-1} \quad (11.5)$$

$c_{1,2}$ — приведенный коэффициент излучения рассматриваемой системы тел, Вт/(м²·К⁴); c_1, c_2 — коэффициенты излучения первого и второго тел соответственно, Вт/(м²·К⁴); T_1, T_2 — абсолютные температуры тел, К; F_1, F_2 — площади поверхностей тел, м².

Если площадь поверхности первого тела во много раз меньше площади поверхности второго тела, т. е. $F_1 \ll F_2$, то согласно выражению (11.5)

$$c_{1,2} = c_1 \quad (11.6)$$

В этом случае коэффициент излучения тела с меньшей площадью поверхности может быть рассчитан на основании (11.4) и (11.6) по формуле

$$c_1 = \frac{Q_{1,2}}{F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]} \quad (11.7)$$

Здесь c_1 выражено в Вт/(м²·К⁴). Значение коэффициента излучения зависит от температуры, материала и состояния поверхности тела.

Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 11.2) представляет собой три тепловые мишени диаметром 115 мм (1) с электронагревателями, последовательно включенными в электрическую цепь. Нагреватели имеют одну и ту же мощность, одинаковым образом расположены на лицевой панели установки. С помощью автотрансформатора (ЛАТР) (2) на них подается напряжение, регулируемое ручкой ЛАТРа. Мишени отличаются друг друга лишь состоянием излучающей поверхности. Первая мишень имеет черную закрашенную поверхность, вторая - закрашенную белую, третья — полированную металлическую.

В центре каждой мишени с внутренней стороны нагревателя зачеканены хромель-копелевые термопары. Электрический сигнал с термопар подается на цифровые измерители температуры (3, 4). В таблице 11.1 описаны сигналы, отображаемые на дисплеях измерителей. Сигнал с измерителей поступает в компьютер через преобразователь. Одновременно эта же температура с наружной стороны мишени может поочередно контролироваться с помощью инфракрасного термометра (пирометра) с лазерным указателем участка излучающей поверхности (5).

Установившийся режим достигается спустя 30-50 минут прогрева мишеней.

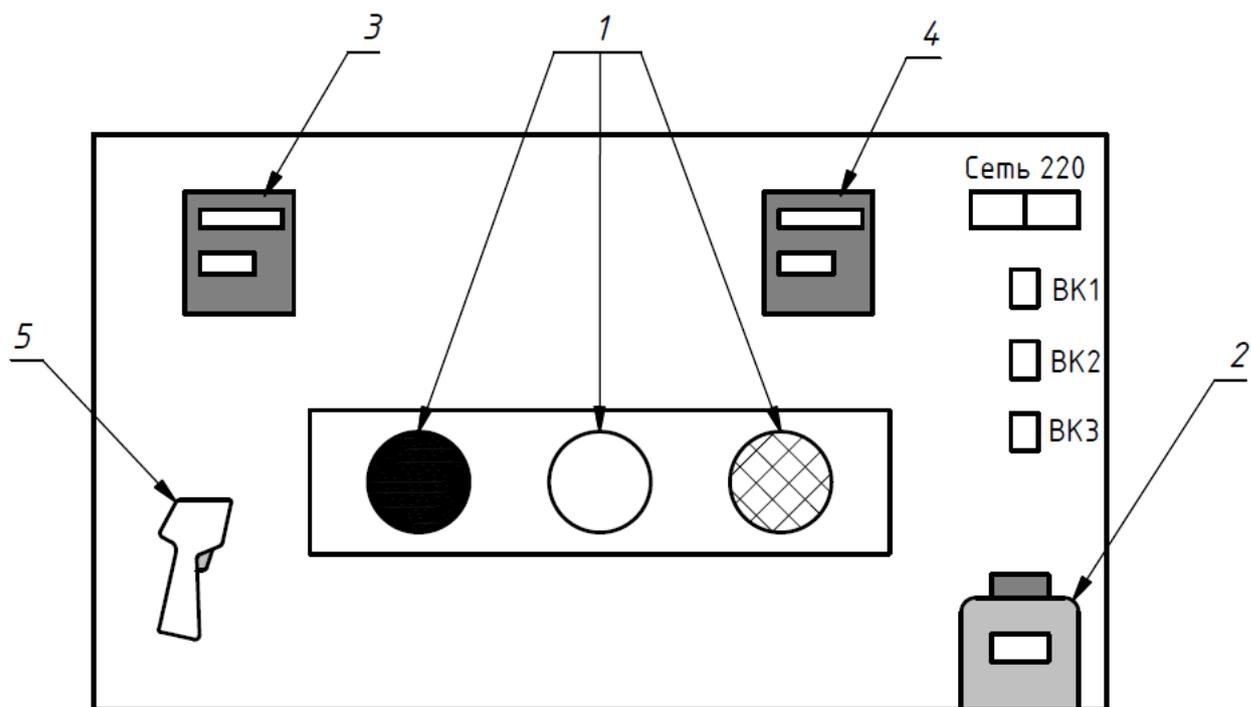


Рисунок 11.2. Схема лабораторного стенда: 1 – тепловые мишени (черная, белая, полированная); 2 – автотрансформатор (ЛАТР); 3, 4 – цифровые измерители ТРМ 200; 5 – ручной ИК-термометр (пирометр).

Таблица 11.1 – Сигналы, отображаемые измерителями ТРМ 200

ТРМ 200 (левый)	Красный	Температура поверхности черной мишени
	Зеленый	Температура поверхности белой мишени
ТРМ 200 (правый)	Красный	Температура поверхности полированной мишени
	Зеленый	Результирующий поток излучения

Порядок проведения работы

1. Изучить методические указания и инструкцию пользователя программы MeasLAB, заготовить форму отчета о проведенной работе и таблицу для записи результатов измерений и вычислений в электронном формате.

2. Включить питание установки с помощью автомата «Сеть 220 В».

3. Включить компьютер, подключить USB-кабель установки и запустить программу проведения лабораторной работы командами Пуск → Программы → MeasLAB → «ИК-излучение».

4. Выставить значение коэффициента излучения на пирометре равным 1 (кнопка л.Set).

5. Включите ЛАТР клавишей ВК1. На ЛАТР выведите напряжение на 15 В.

6. На лицевой панели внесите название сохраняемого файла и запустите программу кнопкой «Пуск».

7. Определить и зафиксировать в отчете температуру окружающей среды T_0 .

8. В течение 5-10 минут наблюдать на лицевой панели компьютерной системы измерения показания термопар (на многолучевом графике) T_1 — черной, T_2 — белой, T_3 — полированной мишеней, закрепленных с внутренних сторон мишеней.

9. Установить пирометр на расстоянии 1 м от мишени таким образом, чтобы лазерное пятно совпадало с центром первой мишени и зафиксировать температуру каждой из мишеней.

10. Остановить кнопкой «Пауза» на лицевой панели программы сбор данных, Сравнить показания термопар и показаний ИК-термометра.

11. Увеличить напряжение на ЛАТРе для последующих измерений до 30 В, 45 В и 60 В, при этом запустив заново сбор данных программой.

12. Обработать полученные данные по всем мишеням и определить степень черноты ε_j для каждой при разных температурах их поверхностей.

$$\varepsilon_j = \frac{T_{ИКj}^4 - T_0^4}{T_j^4 - T_0^4} \quad (11.8)$$

где T_j — температуры черной, белой и полированной мишеней, измеренные термопарой установки, К;

$T_{ИКj}$ - температуры черной, белой и полированной мишеней, измеренные пирометром, К;

T_0 — температура окружающей среды, К.

13. Обработать данные по мишеням и проверить величину коэффициента излучения по уравнению Стефана-Больцмана.

$$C_0 = \frac{Q}{\varepsilon_j \cdot S \cdot \left[\left(\frac{T_j}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]} \quad (11.9)$$

где Q - результирующий поток излучения (зеленый индикатор правого ТРМ 200), $Q = \frac{U^2}{R}$ [Вт], R – общее сопротивление всех последовательно соединенных мишеней и равно 68 Ом, а U - падение напряжения на мишенях, измеряется понижающим трансформатором и платой АЦП;

S — площадь поверхности мишени, $S = \pi \cdot r^2$ [м²], r - радиус мишени 0,12 м.

14. Построить график зависимости степени черноты исследованных поверхностей от температуры мишеней.

15. Сравнить результаты эксперимента со справочными данными (таблица 11.2).

Таблица 11.2 – справочные данные степени черноты для разных типов поверхностей

Материал	Степень черноты
Краска черная	0.96
Краска белая	0.90-0.95
Полированная сталь	0.25-0.55
Полированный алюминий	0.09-0.18

16. Ответить на контрольные вопросы и сделать самостоятельные выводы по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие тела называются абсолютно черными?
2. Запишите и объясните закон Стефана — Больцмана.
3. Что называется коэффициентом излучения абсолютно черного тела?

4. Как видоизменяется закон Стефана — Больцмана, если его применять к реальным телам?
5. Что такое серое тело?
6. Опишите экспериментальную установку для определения коэффициента излучения с использованием ИК-термометра.
7. Назовите величины, измеряемые в этой работе и рассчитываемые по формулам. Как они измеряются? Как рассчитываются?
8. Что будет, если коэффициент излучения, выставленный на пирометре, будет меньше реальной степени черноты исследуемого тела?
9. Могут ли белые поверхности считаться абсолютно черными телами? Если могут, то при каких условиях?