

### ***3.3. Лабораторная работа: «Исследование теплообмена излучением»***

#### ***3.3.1. Введение***

В инженерной практике при расчете потока излучения с поверхности технического устройства необходимо знание интегрального коэффициента теплового излучения твердых тел. В случае отсутствия данных по физическим свойствам необходимого вещества в справочнике, следует прибегнуть к практике теплотехнического эксперимента.

При выполнении работы студенты самостоятельно проведут научное исследование зависимости интегрального коэффициента излучения реальной (серой) поверхности от температуры калориметрическим методом. Кроме того, студенты закрепят знания теории теплообмена излучением, приобретут навыки проведения и обработки научного эксперимента.

#### ***3.3.2. Цели и задачи лабораторной работы***

Целью работы является получение навыков экспериментального определения интегрального коэффициента теплового излучения твердого тела.

Задачами исследования являются:

- 1) определение интегральной излучательной способности твердого тела при разных температурах излучающей поверхности;
- 2) построение зависимости излучательной способности от температуры;
- 3) сопоставление полученных результатов с известными литературными данными;
- 4) составление отчета по выполненной работе.

### 3.3.3. Основные теоретические сведения

Данная работа связана с таким физическим явлением как тепловое излучение. В виду того, что все нагретые материальные объекты излучают энергию в окружающее пространство, возникла необходимость учета составляющей лучистого теплообмена между телами при инженерных расчетах. В чистом виде лучистый теплообмен имеет место лишь в условиях глубокого вакуума.

Тепловое излучение как процесс распространения электромагнитных волн характеризуется длиной волны  $\lambda$  и частотой колебаний  $\nu = c/\lambda$ , где  $c$  – скорость света (в вакууме  $c=3 \cdot 10^8$  м/с). Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу, поэтому классификация излучения по длинам волн в зависимости от производимого ими эффекта носит лишь условный характер. Тепловой поток, излучаемый на всех длинах волн с единицы поверхности тела по всем направлениям, называется поверхностной плотностью потока интегрального излучения  $E$ , Вт/м<sup>2</sup>. Она определяется природой данного тела и его температурой. Это собственное излучение тела.

Поверхностная плотность потока интегрального излучения абсолютно черного тела  $E_0$ , Вт/м<sup>2</sup>, в зависимости от его температуры описывается законом Стефана-Больцмана:

$$E_0 = \sigma_0 T^4 .$$

Здесь  $\sigma_0=5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана. Для технических расчетов закон Стефана-Больцмана обычно записывают в виде

$$E_0 = C_0 (T/100)^4 ,$$

где  $C_0=\sigma_0 \cdot 10^8=5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) называется коэффициентом излучения абсолютно черного тела.

Тела, с которыми мы имеем дело на практике, излучают меньше тепловой энергии, чем абсолютно черное тело при той же температуре. Встречая на своем пути другое вещество, тепловые лучи частично поглощаются, и их энергия снова превращается в теплоту, частично

отражаются и проходят сквозь тело. В большинстве твердых и жидких тел поглощение тепловых лучей завершается в тонком поверхностном слое, т.е. не зависит от толщины тела. Для этих тел тепловое излучение обычно рассматривается как поверхностное явление. В данной работе в основу метода положено уравнение результирующего лучистого потока, описывающее теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде между нагретым телом (вольфрамовая проволока) и охлаждаемой оболочкой (стеклянная трубка):

$$Q_{12} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (3.3.1)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенный интегральный коэффициент теплового излучения системы тел

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right];$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – соответственно интегральные коэффициенты теплового излучения исследуемой проволоки и оболочки;  $F_1, F_2$  – поверхности проволоки и оболочки, м. Поскольку площадь поверхности вольфрамовой проволоки мала по сравнению с площадью поверхности оболочки ( $F_1 \ll F_2$ ), то в формуле (1)  $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_1$ .

Для определения  $\varepsilon_1$  необходимо знать температуру проволоки  $T_1$  и температуру стенки внутренней стеклянной трубки  $T_2$  (в шкале Кельвина) и определить плотность потока излучения с поверхности проволоки

$$E = Q / (\pi dl),$$

где  $Q$  – мощность, необходимая для нагрева проволоки, Вт;  $d$  – диаметр вольфрамовой проволоки, м;  $l$  – длина проволоки, м.

Вольфрамовая проволока нагревается постоянным током, величина которого определяется расчетным путем по падению напряжения на образцовом элементе сопротивления

$$I = U_0 / R_0, \text{ А.}$$

В установившемся тепловом режиме выделяемая постоянная мощность пропорциональна падению напряжения на рабочем участке проволоки

$$Q = IU_1.$$

Температуру вольфрамовой проволоки  $t_1$  вычисляют по ее электрическому сопротивлению  $R_1$ , которое находится по напряжению и силе тока

$$R_1 = U_1 / I, \text{ Ом.}$$

При нагреве проволоки электрическим током необходимо учитывать зависимость сопротивления металла от температуры

$$R_1 = R_{12}[1 + \alpha_R(t_1 - t_2)], \text{ Ом}, \quad (3.3.2)$$

где  $\alpha_R$  – температурный коэффициент сопротивления металла,  $R_{12}$  – сопротивление вольфрамовой проволоки при температуре окружающей среды  $t_2$  °С.

Используя зависимость (3.3.2), формула для определения температуры вольфрамовой проволоки примет вид

$$t_1 = \frac{R_1 - R_{12}}{\alpha_R R_{12}} + t_2, \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_1 = t_1 + 273,15, \text{ К}.$$

### **3.3.4. Контроль знаний студента**

Входной теоретический контроль позволяет оценить усвоенные студентом знания и получить допуск к работе.

#### ***Что называется абсолютно черным телом?***

- а) твердое тело черного цвета, которое при любой интенсивности его освещения остается черным;
- б) тело, которое имеет одинаковую спектральную характеристику, поглощение во всем диапазоне длин волн;
- в) тело, которое в заданном диапазоне длин волн, только поглощает электромагнитное излучение, при этом ничего не пропускает и ничего не отражает.

#### ***Дайте формулировку закона Стефана – Больцмана.***

- а) интегральная интенсивность излучения абсолютно черного тела, обратно-пропорциональна абсолютной температуре его поверхности в 4 степени;
- б) интегральная интенсивность излучения абсолютно черного тела, зависит только от характеристик поверхности тела;
- в) интегральная интенсивность излучения абсолютно черного тела, пропорциональна абсолютной температуре его поверхности в 4 степени.

#### ***Из чего состоит экспериментальный участок для исследования теплообмена излучением?***

- а) нагреваемая нить, помещенная в вакуумированную трубку, окруженную оболочкой с охлаждающей жидкостью внутри;
- б) нагреваемая нить, помещенная в трубку, по которой течет воздух, окруженную оболочкой с охлаждающей жидкостью внутри;

в) нить, помещенная в вакуумированную трубку, окруженную оболочкой, с нагретой жидкостью внутри.

### 3.3.5. Программа исследования

#### 3.3.5.1. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис.3.3.1.

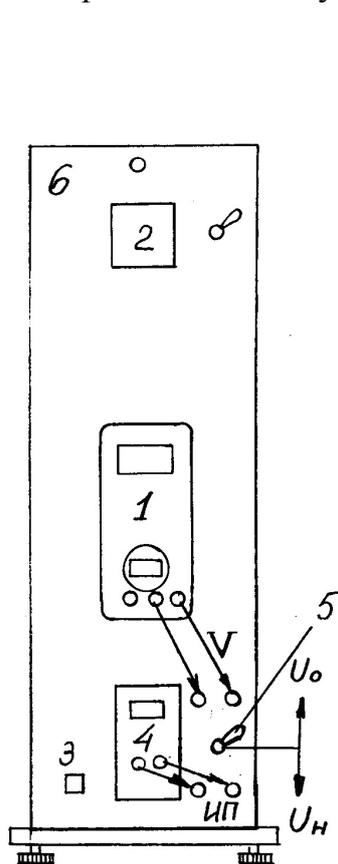


Рис. 3.3.1. Схема установки

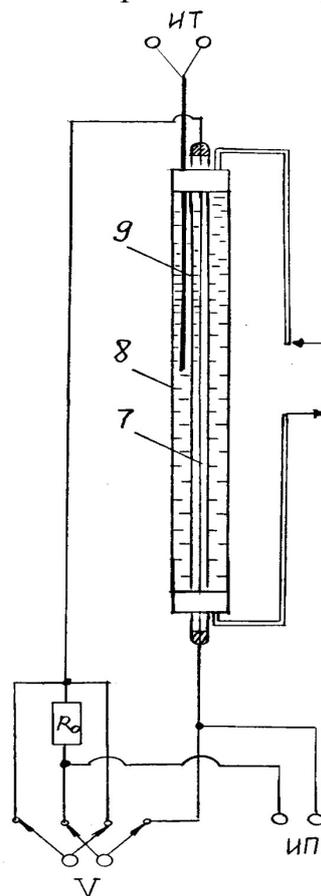


Рис. 3.3.2.. Рабочий участок установки

На передней панели находится двухканальный измеритель температуры (2) типа 2ТРМО, подключённый к хромель-копелевой термопаре, универсальный вольтметр (1) типа МУ-67 с автоматическим переключением пределов измерений, тумблёр электропитания установки (3), разъёмы (V) для подключения вольтметра (1), тумблёр (5) для переключения вольтметра на измерение падения напряжения на образцовом сопротивлении ( $U_o$ ) и напряжения на вольфрамовой проволоке ( $U_n$ ).

На рис.3.3.2. приведена принципиальная схема рабочего участка, электрическая схема питания и измерений. Нагреваемая вольфрамовая проволока (7) находится в цилиндрическом стеклянном баллоне (8) с двойными стенками, между которыми находится вода. Внутренняя трубка вакуумирована до  $10^{-5}$  мм.рт.ст. Температура стенки этой трубки  $T_2$  считается равной температуре воды циркулирующей между двойными стенками и постоянной в течение опыта. Она определяется хромель-копелевой термопарой (9), соединённой с измерителем температуры (2). Баллон с нитью укреплен в модуле (6), который находится на лабораторном стенде. **Электропитание к вольфрамовой проволоке подводится внутри установки от источника питания (4).** Последовательно с вольфрамовой проволокой включено образцовое сопротивление ( $R_0$ ) для определения величины электрического тока в цепи по измеренному на нем значению падения напряжения. Для измерения напряжения на вольфрамовой проволоке  $U_1$  и напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$  к разъёмам (V) подключается мультиметр (1).

### 3.3.5.2. Проведение опыта

После ознакомления с описанием экспериментальной установки необходимо заготовить форму протокола для записи наблюдений.

Проведение эксперимента осуществляется по следующей схеме:

1. Записать данные установки, условия опыта.
2. **Убедиться в том, что все приборы выключены.** Измерить мультиметром (в режиме измерения сопротивления) электрическое сопротивление вольфрамовой проволоки  $R_{12}$  при комнатной температуре  $t_2$ .
3. Повернуть регулятор напряжения блока питания против часовой стрелки до упора. Включить стенд тумблером (3). Включить источник питания (4), мультиметр (1) и измеритель температуры (2).
4. Определить (задаёт преподаватель) значения напряжений, при которых проводятся измерения. Рекомендуемые значения напряжений, устанавливаемые на блоке питания: 6, 8, 10, 12, 16 вольт.
5. Переключить тумблер (5) в положение  $U_n$ . Установить первое значение напряжения на проволоке, следя за показаниями вольтметра. Произвести отсчет напряжения на проволоке  $U_1$ .
6. Переключить тумблер (5) в положение  $U_0$ . Произвести отсчет напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$ .

7. Определить температуру стенки трубки  $t_2$  по показаниям измерителя температур (2).
8. Пункты 5 и 6 повторить для следующих значений напряжений, устанавливаемых на вольфрамовой проволоке.
9. Убрать напряжение на проволоке. Выключить приборы и стенд.

### 3.3.6. Обработка результатов исследования

Данные установки и таблица результатов измерений:  
 диаметр вольфрамовой проволоки  $d = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м;  
 образцовое сопротивление  $R_0 = 0,1$  Ом;  
 температурный коэффициент сопротивления вольфрама  $\alpha_R = (3,9 - 4,5)10^{-3}$ , 1/К;  
 длина проволоки  $l = 0,45$  м.

Используя данные измерений на рабочем участке установки, по уравнению (1) находят коэффициент излучения исследуемого тела. Такой расчет делается для каждого температурного режима, заносятся в таблицу наблюдений, а затем строится график зависимости коэффициента излучения от температуры  $\varepsilon_1 = f(t_1)$  в исследуемом интервале температур.

Таблица 3.3.1 Результаты измерений и вычислений

№ п/п	$t_1$ , °С	$T_1$ , К	$t_2$ , °С	$T_2$ , К	$U_0$ , В	$U_1$ , В	$I$ , А	$Q$ , Вт	$\varepsilon_1$
1									
...									
5									

### 3.3.7. Анализ результатов

Полученную зависимость коэффициента излучения от температуры необходимо сравнить с литературными данными, например [6], провести оценку погрешности измерения и сделать выводы. Максимально возможная погрешность измерения интегрального коэффициента теплового излучения исследуемой поверхности определяется при использовании уравнения (3.3.1) с учетом применяемых измерительных приборов:

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{4(\Delta T_1 + \Delta T_2)}{T_1^4 - T_2^4},$$

где  $\Delta$  – абсолютные погрешности измерения отдельных величин.

### ***3.3.8. Требования к содержанию отчета по работе***

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

6. Титульный лист.
7. Задание к лабораторной работе.
8. Описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта.
9. Результаты расчета оформить в виде таблицы (3.3.1) .
10. Анализ результатов и выводы по работе.