

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА ФИЗИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению лабораторной работы
ТМО-10**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ
ПОВЕРХНОСТИ
МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ**

Брест 2014

В методических указаниях приведено описание лабораторной работы ТМО-10 "Определение степени черноты поверхности методом сравнения". В работе достаточно подробно обсуждается суть метода сравнения. Показывается, что если имеются две пластины с одинаковыми температурами и размерами, и при этом степень черноты одной из пластин известна, тогда, определяя на опыте электрическую мощность нагревателей, можно рассчитать степень черноты другой пластины.

Методические указания к лабораторной работе ТМО-10 предназначены для студентов всех технических специальностей и всех форм обучения в БрГТУ.

Составители: А.И. Пинчук, к.ф.-м.н., доцент
В.Д. Акельев, д.т.н., профессор
Н.Ф. Клименко, инженер-электронщик

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ТМО-10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ

1. Цель работы

Определение степени черноты тела методом сравнения.

2. Приборы и принадлежности

Лабораторная установка, состоящая из зачерненной и полированной пластин, лабораторного автотрансформатора и измерительных приборов.

3. Общие сведения

По закону Стефана-Больцмана плотность интегрального излучения абсолютно черного тела равна

$$E_0 = \sigma T^4, \quad (3.1)$$

где σ – постоянная излучения абсолютно черного тела,

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Для инженерных расчетов формулу (3.1) удобнее представить в следующем виде:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3.2)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела,

$$C_0 = 5.67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Серыми считаются тела, спектр излучения которых непрерывен и подобен излучению абсолютно черного тела. Для серых тел

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3.3)$$

где ε – степень черноты.

Степень черноты показывает отношение потока собственного излучения тела E к потоку излучения черного тела E_0 при той же температуре:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C \left(\frac{T}{100} \right)^4}{C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4} = \frac{C}{C_0}. \quad (3.4)$$

Степень черноты зависит от природы материала, его температуры, состояния материала, а также состояния поверхности и длины волны.

Приведенная степень черноты системы тел, из которых одно находится в полости другого, равна

$$\varepsilon_{PP} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_M} + \frac{F_M}{F_B} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right)}, \quad (3.5)$$

где ε_M и F_M – степень черноты и площадь поверхности меньшего тела; ε_B F_B – степень черноты и площадь поверхности большего тела.

Если $F_M \ll F_B$, то $\frac{F_M}{F_B} \rightarrow 0$ и $\varepsilon_{PP} \cong \varepsilon_M$.

Суть метода определения степени черноты методом сравнения заключается в следующем. Если две пластины с одинаковыми температурами и размерами (степень черноты одной из пластин известна), разместить одинаково в пространстве, то их конвективные тепловые потоки будут равны между собой:

$$Q_{K_1} = Q_{K_2}. \quad (3.6)$$

Потоки теплоты, излучаемые пластинами, будут равны:

$$Q_{Л_1} = \varepsilon_{PP_1} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] F_1; \quad (3.7)$$

$$Q_{Л_2} = \varepsilon_{PP_2} C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] F_2, \quad (3.8)$$

где T_1 и T_2 – температуры первой и второй пластины соответственно, К; $T_{жс}$ – температура поверхностей окружающих пластины тел, принимаемая равной температуре окружающей среды, К.

Если площадь тел, окружающих пластины, значительно больше площади пластин, то можно принять:

$$\varepsilon_{PP_1} \cong \varepsilon_1; \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{PP_2} \cong \varepsilon_2. \quad (3.10)$$

Поскольку $T_1 = T_2$ и $F_1 = F_2 = F$, то (3.7) можно записать в виде:

$$Q_{Л_1} = \varepsilon_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] F; \quad (3.11)$$

$$Q_{Л_2} = \varepsilon_2 C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] F. \quad (3.12)$$

Вычитая (3.12) из (3.11), получим:

$$Q_{Л_1} - Q_{Л_2} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] F. \quad (3.13)$$

В условиях стационарности общие потоки теплоты от пластин за счет естественной конвекции и теплового излучения будут равны:

$$Q_1 = Q_{K_1} + Q_{J_1} = I_1 U_1; \quad (3.14)$$

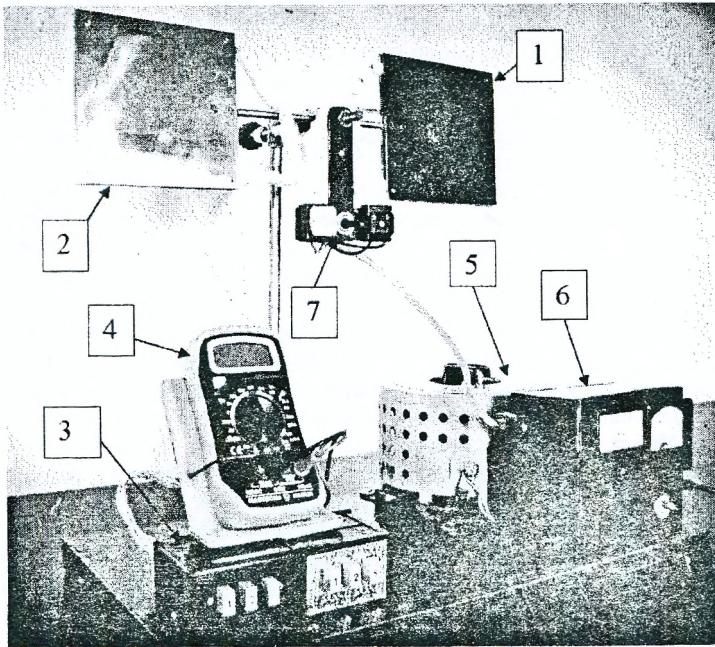
$$Q_2 = Q_{K_2} + Q_{J_2} = I_2 U_2, \quad (3.15)$$

где I_1 и I_2 – силы тока в электрических нагревателях внутри пластин, А; U_1 и U_2 – падение напряжения в нагревателях, В.

Вычитая (3.15) из (3.14) и учитывая (3.6) и (3.13), получим расчетную формулу для определения степени черноты второй пластины:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 - \frac{I_1 U_1 - I_2 U_2}{C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right] F}. \quad (3.16)$$

4. Описание лабораторной установки



Установка состоит из двух пластин 1 и 2 с размерами 120×120 мм, закрепленных на лабораторном штативе. Каждая пластина выполнена из двух металлических листов, между которыми находятся плоские электрические нагреватели. Стальная поверхность пластины 1 покрыта слоем черной масляной краски. Стальная поверхность пластины 2 отполирована. Температура каждой пластины измеряется с помощью трех термопар, одна из которых запаяна в центре пластины, а две другие – у верхнего и нижнего краев пластины. Переключение

термопар осуществляется с помощью кнопочного переключателя 3 путем нажатия номера требуемой термопары (остальные переключатели должны быть отжаты). Измерение температуры осуществляется мультиметром 4. При этом переключатель мультиметра должен находиться против отметки "°C" на шкале режимов измерений. Лабораторный автотрансформатор 5 позволяет увеличивать электрическую мощность нагревателя внутри пластин путем вращения ручки регулятора по часовой стрелке вплоть до установленного ограничителя мощности. Измерительный блок 6 включает в себя амперметр и вольтметр и, соответственно, позволяет регистрировать значения силы тока I и падение напряжения U в цепи. Переключение электропитания между зачерненной и полированной пластинами осуществляется ключом 7.

4. Проведение измерений

Подсоедините лабораторный автотрансформатор к сети и включите его тумблером, который расположен на передней панели. Установите мультиметр в соответствующий режим измерения (режим измерения температуры). Измерьте температуру окружающего воздуха с помощью термометра, установленного в лаборатории. Задайте по указанию преподавателя начальное значение напряжения и силы тока с помощью регулятора блока питания. Далее увеличивайте электрическую мощность плоских нагревателей внутри пластин с интервалом значений напряжения, задаваемого преподавателем. Рекомендуемые значения падения напряжения в цепи равны 24, 30 и 36 вольт.

При включении электрического нагревателя внутри пластины в электрическую цепь в нем выделяется теплота, расходуемая на нагрев пластин и теплопотери. Через некоторое время вся теплота, выделяющаяся в нагревателе, расходуется на покрытие тепловых потерь в окружающую среду. Начиная с этого момента, температура наружной поверхности пластин не будет изменяться, что указывает на установление стационарного режима. Для осуществления корректных измерений сначала включите нагреватель полированной пластины 2, переведя ключ 7 в крайнее левое положение. Установите рекомендуемый уровень падения напряжения в цепи с помощью лабораторного автотрансформатора 5. Дождитесь установления стационарного режима (когда показания мультиметра стабилизируются). Время установления стационарного режима в этом случае составляет не менее 30 мин. Затем переведите ключ 7 в крайнее правое положение, чтобы включить электрический нагреватель зачерненной пластины 1 при том же рекомендуемом значении падения напряжения, что и для полированной пластины. По достижению стационарного режима (по истечении не менее 20 мин) плавно добавляйте уровень напряжения (с интервалом не более 6 В) с целью выравнивания температур обеих пластин.

Результаты измерений заносите в таблицу:

Температура окружающего воздуха $t_a, ^\circ\text{C}$	Пластина 1					Пластина 2								
	I_1, A	U_1, B	Температура поверхности			$i_1^{\text{средн}}$	I_2, A	U_2, B	Температура поверхности ($i_2^{\text{средн}} = i_1^{\text{средн}}$)					
			№ 1	№ 2	№ 3				№ 1	№ 2	№ 3			

5. Задания для самостоятельной работы

Рассчитайте степень черноты второй пластины по формуле 3.16. Степень черноты первой пластины примите равной 0.95.

Сравните полученные данные с данными таблицы П1 Приложения.

Проанализируйте результаты опыта и сделайте выводы.

6. Дополнительное задание

Определение коэффициента конвективного теплообмена по критериальному уравнению подобия

Аналитическое определение α_k представляет собой сложную задачу, поскольку в этом случае необходимо решить систему дифференциальных уравнений. Поэтому для расчета используют критериальные уравнения подобия. Числа подобия позволяют анализировать подобные явления, имея экспериментальные данные лишь по какому-либо одному из подобных явлений. Кроме того, они позволяют сократить число неизвестных переменных. Из теории подобия следует, что сложные процессы характеризуются не отдельными физическими величинами, а определенным образом составленными из них безразмерными комплексами или критериями. Если на основе теории подобия объединить физические и геометрические параметры в безразмерные комплексы (критерии подобия), то процесс теплообмена в условиях естественной конвекции можно описать следующими тремя числами.

Число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (6.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; l – характерный размер твердого тела; λ – теплопроводность жидкости или газа, Вт/(м·К). Число Нуссельта является безразмерным коэффициентом теплоотдачи.

Число Грасгофа:

$$Gr = \frac{g\beta(T_c - T_{ж})l^3}{\nu^2}, \quad (6.2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент объемного расширения жидкости, который для идеальных газов равен $\beta = 1/T$, К; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с, которая обусловлена силами внутреннего трения. Число Грасгофа характеризует соотношение между подъемной силой и силой вязкого трения.

Число Прандтля:

$$Pr = \nu/a, \quad (6.3)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с. Число Прандтля определяет физические свойства жидкости.

Температуру поверхности пластин (температура стенки t_c) выясните у преподавателя.

Для аналитического определения α_k выполните следующие действия:

- находим характерную температуру $t_m = 0.5(t_c + t_j)$;
- по этой температуре выбираем теплофизические характеристики жидкости (из Табл. П2): коэффициент вязкости ν , коэффициент теплопроводности λ , а также число Прандтля Pr ;
- рассчитываем коэффициент объемного расширения β (для газа $\beta = 1/T$);
- используя теплофизические характеристики воздуха, рассчитываем число Грасгофа по формуле (6.2); где характерным размером является высота пластины l ;
- находим число Релея из соотношения

$$Ra = GrPr; \quad (6.4)$$

- рассчитываем число Нуссельта из формулы

$$Nu = c(Ra)^n, \quad (6.5)$$

где c и n – коэффициенты, зависящие от числа Рэлея. Их определяем из таблицы, показанной ниже:

Значения коэффициентов c и n

Число Релея	c	n
$1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

- наконец, находим коэффициент теплоотдачи α_k из соотношения $\alpha_k = \frac{Nu\lambda}{l}$.

Контрольные вопросы

1. Закон Стефана-Больцмана.
2. В чем состоит суть метода сравнения?
3. Приведенный показатель степени черноты.
4. Как увеличить или уменьшить степень черноты тел?
6. Что представляют собой числа подобия и критериальные уравнения?
7. Физическая сущность чисел Нуссельта, Грасгофа, Релея и Прандтля.

Таблица П1

Степень черноты полного нормального излучения материала

№ пп	Наименование материала	t, °C	ε
1	Алюминий: шероховатый окисленный полированный	20...50	0,055
		- " -	0,15
		- " -	0,048
2	Алюминиевая краска	50	0,5
3	Асбестовый картон	20	0,96
4	Асбошифер	20	0,96
5	Бетон	20	0,8
6	Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,95
7	Железо литейное необработанное		0,91
8	Кирпич красный шероховатый	20	0,88...0,93
9	Кирпич огнеупорный	500...1000	0,65...0,75
10	Кирпич шамотный	20	0,85
11	Легунь: окисленная полированная прокатанная		0,6
			0,03
			0,20
12	Масляная краска		0,94
13	Медь: окисленная полированная		0,62
			0,02
14	Никель окисленный		0,4
15	Нихромовая проволока		0,96
16	Серебро полированное		0,02
17	Сталь: окисленная окисленная шероховатая полированная ржавая красная		0,80
		80	0,95
		750...1050	0,52...0,56
		20	0,69
18	Сигл		0,96
19	Стекло	20...100	0,94...0,91
		250...1000	0,87...0,72
		1100...1500	0,7...0,67
20	Толь	20	0,91...0,93
21	Хром	20	0,17
22	Чугун: обточенный шероховатый окисленный		0,65
			0,96
23	Шлак котельный	0...100	0,97...0,93
		200...500	0,89...0,78
		600...1200	0,76...0,70
		1400...1800	0,69...0,67

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители:

*Пинчук Александр Иванович
Акельев Валерий Дмитриевич
Клименко Николай Фёдорович*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы
ТМО-10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ

Ответственный за выпуск: Пинчук А.И.
Редактор: Боровикова Е.А.
Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано к печати 29.05.2014 г. Формат 60x84¹/₁₆. Гарнитура Times New Roman.
Бумага Performer. Усл. п. л. 0,7. Уч. изд. 0,75. Заказ № 431. Тираж 50 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.