

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»  
Кафедра теоретических основ теплотехники

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ТВЁРДОГО ТЕЛА  
МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Тепломассообмен»

Иваново 2014

Составители: В.В. БУХМИРОВ  
Т.Е. СОЗИНОВА  
А.К. ГАСЬКОВ

Редактор Г.Н. ЩЕРБАКОВА

Методические указания содержат краткую теоретическую справку по изучаемой теме, описание лабораторного компьютерного стенда, методику проведения и обработки результатов эксперимента.

Предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Тепломассообмен».

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЁРДОГО ТЕЛА МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Тепломассообмен»

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович  
СОЗИНОВА Татьяна Евгеньевна  
ГАСЬКОВ Александр Константинович

Редактор Т.В. Соловьева

Подписано в печать Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Печать плоская. Усл.печ.л. 0,69. Тираж 100 экз. Заказ №  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»  
153003, г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

## ЗАДАНИЕ

1. Экспериментально определить коэффициент теплопроводности фторопласта методом пластины (плоского слоя).
2. Аппроксимировать результаты опытов линейной зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры.

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно современной молекулярно-кинетической теории перенос теплоты теплопроводностью (кондукцией) происходит вследствие взаимодействия микрочастиц вещества (молекул, атомов, свободных электронов и т.п.) в переменном температурном поле [1]. Таким образом, в неоднородном температурном поле теплопроводность имеет место в веществе любого фазового состояния – в газах, жидкостях и твердых телах. Однако нагрев и охлаждение твердых тел осуществляется только теплопроводностью и поэтому в качестве объекта исследования в данной лабораторной работе выбрано твердое тело в виде диска из фторопласта.

Перенос теплоты теплопроводностью описывается законом Фурье:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}(T), \quad (1)$$

где  $\vec{q} = \vec{Q}/F$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\text{grad}(T)$  – градиент температуры, град/м.

Знак "минус" в уравнении (1) показывает, что направление теплового потока противоположно направлению градиента температуры.

Для одномерных стационарного  $T(x)$  или нестационарного  $T(x, \tau)$  температурных полей в декартовой системе координат градиент температуры рассчитывают по формуле

$$\text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i}, \quad (2)$$

где  $\vec{i}$  – единичный вектор вдоль оси абсцисс.

В нестационарных процессах  $\text{grad}(T)$  в каждой точке тела изменяется во времени.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  характеризует способность вещества проводить теплоту [1] и является одной из основных для тепловых расчетов характеристик вещества, определяемых экспериментально.

Из уравнения (1) следует, что коэффициент теплопроводности численно равен плотности теплового потока при температурном градиенте равном единице.

В стационарном режиме теплопроводности при допущении  $\lambda \neq f(T)$  одномерное температурное поле в плоской стенке подчиняется линейному закону (рис. 1):

$$T(x) = T_{w1} - \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\delta} x, \quad (3)$$

где  $T_{w1}$  и  $T_{w2}$  – температуры на поверхностях плоской стенки, °С или К;  $\delta$  – толщина стенки, м.

В этом случае градиент температурного поля равен

$$\text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{T_{w1} - T_{w2}}{\delta} \quad (4)$$

Подставляя значение градиента температуры в формулу (1), получим:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_{w1} - T_{w2}) \quad (5)$$

Из выражения (5) можно найти значение коэффициента теплопроводности, если предварительно измерить тепловой поток и температуры на поверхностях плоской стенки

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{T_{w1} - T_{w2}} \quad (6)$$

В этом случае экспериментально найденное значение коэффициента теплопроводности соответствует средней температуре плоской стенки  $\bar{T} = 0,5(T_{w1} + T_{w2})$ .

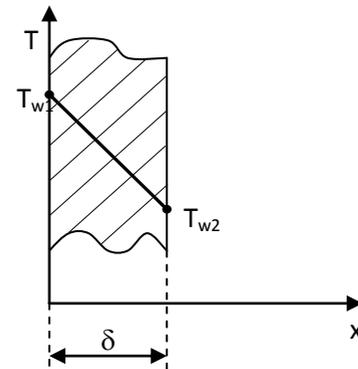


Рис.1. Одномерное температурное поле в плоской стенке

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка работает по методу имитационного моделирования. При проведении лабораторной работы одним из основных управляющих органов является клавиатура и «мышь» компьютера, которые служат для выбора режима исследования и ввода значений параметров. Результаты выполнения лабораторной работы выводятся на экран монитора.

Схема рабочего участка экспериментальной установки, система его питания и результаты измерений представлены на экране монитора (рис. 2). Исследуемые образцы I выполнены из фторопласта в форме дисков толщиной  $\delta = 5$  мм и диаметром  $d = 140$  мм.

Между дисками помещен плоский нагреватель II высотой  $h = 12$  мм и диаметром  $d_n = 146$  мм, внутри которого расположен нагревательный элемент с электрическим сопротивлением  $R_{эл} = 41$  Ом. Тепловой поток, создаваемый нагревателем, определяется по падению напряжения и известному сопротивлению нагревателя. Показания цифрового вольтметра отображаются индикатором V на экране монитора (рис.2). Высокая теплопроводность корпуса нагревателя и равномерное распределение обмотки нагревательного элемента обеспечивают постоянную температуру на поверхности нагревателя и, следовательно, на нагреваемых внутренних поверхностях образцов.

Тепловой поток проходит от нагревателя II через исследуемые фторопластовые образцы и отводится протекающей через холодильник III водой. Холодильник представляет собой емкость со спиральными канавками, создающими циркуляцию охлаждающей воды, которая обеспечивает одинаковую температуру на охлаждаемых поверхностях опытных образцов.

Для уменьшения потерь теплоты через торцевые поверхности образцов в окружающую среду предусмотрен теплоизоляционный кожух IV, выполненный из асбоцемента. Кожух представляет собой полый цилиндр с внутренним диаметром 146 мм и внешним диаметром 190 мм. Высота кожуха  $h_k = 22$  мм.

Температуры на поверхностях образцов измеряются хромель-копелевыми термопарами, значение термоЭДС которых выводятся на экран монитора. Горячие спаи 1-й и 2-й термопар расположены на наружной (охлаждаемой) поверхности, горячие спаи с 3-й по 6-ю термопар расположены на внутренней (нагреваемой) поверхности образца, горячий спай 7-й термопары установлен на внешней поверхности теплоизоляционного кожуха и служит для определения тепловых потерь через торцевую поверхность образцов. Общий холодный спай всех термопар помещен в сосуд Дьюара с тающим льдом и, соответственно, находится при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ .

Температуры на обогреваемой и охлаждаемой поверхностях диска зависят от мощности нагревателя и режима охлаждения (температуры охлаждающей воды и ее расхода). Для упрощения расчета теплопередачи через диск в данной лабораторной работе использована зависимость между напряжением на нагревателе и температурой обогреваемой поверхности, которая графически представлена на рис. 3. В ходе эксперимента температура горячей (нагреваемой) поверхности уточняется по показаниям термопар 3÷6.

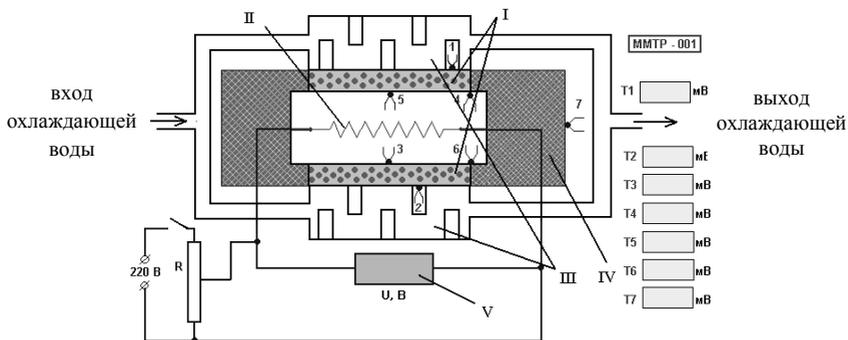


Рис.2. Рабочий участок экспериментальной установки

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Запустить программу `tr_001.exe`. При этом на экране монитора отобразится схема рабочего участка экспериментальной установки (рис.2).

2. В меню "Параметры" установить заданное преподавателем значение температуры нагреваемой поверхности (температура горячей поверхности изменяется в пределах от 50 до 100 °С).

3. По графику на рис. 3 определить необходимое для заданного режима теплопроводности напряжение на нагревателе. Установить данное напряжение при помощи ручки управления реостатом  $R$ , контролируя его значение по индикатору  $V$  на экране монитора. Зафиксировать в журнале наблюдений (табл. 1) значение напряжения  $U$ .

4. Зафиксировать в журнале наблюдений (табл. 1) значения термоЭДС хромель-копелевых термопар.

5. Для проведения следующего эксперимента с новым значением температуры горячей поверхности необходимо повторить все действия, начиная с п. 2. Количество экспериментов определяет преподаватель.

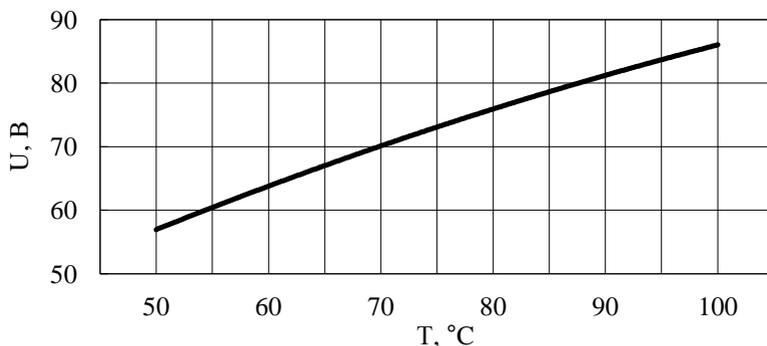


Рис.3. Зависимость напряжения электроннагревателя от температуры горячей поверхности образца

Таблица 1. Журнал наблюдений

Номер режима	U, В	Показания термопар						
		E <sub>1</sub> , мВ	E <sub>2</sub> , мВ	E <sub>3</sub> , мВ	E <sub>4</sub> , мВ	E <sub>5</sub> , мВ	E <sub>6</sub> , мВ	E <sub>7</sub> , мВ
1								
2								
.								
.								
.								
N								

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты обработки опытных данных должны быть представлены в табл. 2. Для заполнения табл. 2 необходимо:

1. При помощи градуировочной таблицы 3 для хромель–копелевых термопар по значению термоЭДС определить температуры во всех контролируемых точках.

2. Рассчитать среднюю температуру горячей (внутренней) поверхности  $T_{w1}$  и среднюю температуру холодной (наружной) поверхности  $T_{w2}$  исследуемых фторопластовых образцов:

$$T_{w1} = \frac{T_3 + T_4 + T_5 + T_6}{4}; \quad (7)$$

$$T_{w2} = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (8)$$

3. Найти среднюю по толщине температуру исследуемого образца

$$T_{cp} = \frac{T_{w1} + T_{w2}}{2}. \quad (9)$$

4. Определить тепловой поток, создаваемый нагревателем. Мощность электронагревателя рассчитывается по показаниям вольтметра при известном электрическом сопротивлении

$$Q_n = N_{эл} = \frac{U^2}{R_{эл}}. \quad (10)$$

5. Определить тепловые потери через кожух цилиндрической формы по формуле

$$Q_{ном} = \frac{5\pi\lambda_k}{2} \left( \frac{d_k + d_n}{d_k - d_n} \right) (h_n + h_k) (T_{w1} - T'_{w2}), \quad (11)$$

где  $T'_{w2}$  – температура наружной поверхности кожуха (определяется по показанию 7-й термопары);  $\lambda_k = 0,08$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности материала кожуха (асбоцемента);  $d_n = 0,146$  м – наружный диаметр нагревателя;  $d_k = 0,19$  м – внешний диаметр кожуха;  $h_n = 0,012$  м – высота нагревателя;  $h_k = 0,022$  м – высота кожуха.

6. Рассчитать тепловой поток, передаваемый через опытные образцы за счет теплопроводности:

$$Q = Q_n - Q_{ном}. \quad (12)$$

7. Определить коэффициент теплопроводности фторопласта по формуле (6) принимая во внимание, что поверхностная плотность теплового потока равна:

$$q = \frac{Q}{2F}, \quad (13)$$

где  $F = \pi \cdot d^2/4$  – площадь поверхности одного образца;  $d = 0,14$  м – диаметр исследуемого образца.

Таблица 2. Результат обработки экспериментальных данных

№ опыта	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_{w1}$	$T_{w2}$	$T_{cp}$	$\lambda$
1											
2											
·											
·											
·											
N											

В заключение получим зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в виде линейной функции

$$\lambda = \lambda_0(1 + b \cdot T) \quad (14)$$

Для определения коэффициентов аппроксимации  $\lambda_0$  и  $b$  необходимо получить результаты обработки минимум двух экспериментов с разными температурными режимами.

Для определения  $\lambda_0$  и  $b$  по двум экспериментам используется система уравнений

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_0(1 + b \cdot T_{cp,1}) \\ \lambda_2 = \lambda_0(1 + b \cdot T_{cp,2}) \end{cases}, \quad (15)$$

решая которую несложно получить:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_2 - \lambda_1 \frac{T_{cp,2}}{T_{cp,1}}}{1 - \frac{T_{cp,2}}{T_{cp,1}}}; \quad b = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0 T_{cp,1}}. \quad (16)$$

При проведении более двух экспериментов значения  $\lambda_0$  и  $b$  рассчитывают по следующим зависимостям:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i \frac{T_1}{\sum_{i=1}^N T_i}}{1 - N \frac{T_1}{\sum_{i=1}^N T_i}}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i - N \lambda_0}{\lambda_0 \sum_{i=1}^N T_i}, \quad (17)$$

где N – число экспериментов.

Таблица 3. Градуировочная таблица для хромель-копелевых термопар

		Единицы									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Десятки	0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
	10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
	20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
	30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
	40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
	50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
	60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
	70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
	80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
	90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
	100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
	110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10	

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение температурного поля. Назовите характеристики температурного поля.
2. Опишите одномерное стационарное температурное поле в неограниченной пластине. Дайте его аналитическое и графическое изображение.
3. Как изменяется градиент температуры по толщине плоской пластины при стационарном тепловом потоке, если коэффициент теплопроводности  $\lambda$  не зависит от температуры?
4. Дайте объяснение понятиям: тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, линейная плотность теплового потока; приведите единицы их измерения.

5. Охарактеризуйте процесс теплопроводности.
6. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.
7. Что характеризует коэффициент теплопроводности?
8. Напишите дифференциальное уравнение теплопроводности для пластины в стационарном режиме.
9. Дайте характеристику условий однозначности. С какой целью они задаются?
10. Назовите способы задания граничных условий для дифференциального уравнения теплопроводности? Перечислите их и дайте краткое определение.
11. Укажите связь между коэффициентом теплопроводности, коэффициентом температуропроводности и удельной теплоемкостью материалов?
12. Поясните принцип работы экспериментальной установки и назначение ее элементов.
13. Перечислите измерительные приборы и дайте характеристику измеряемых величин, указав их единицы измерения.
14. Объясните принцип измерения температуры с помощью термопар.
15. Опишите порядок обработки экспериментальных данных для определения коэффициента теплопроводности.
16. Опишите порядок получения зависимости коэффициента теплопроводности от температуры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.В. Бухмиров, Теоретические основы теплотехники. Основы тепломассообмена / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» – Иваново, 2011. – 68 с.
2. В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен»: учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2009.– 104 с.