

Министерство образования Российской Федерации  
Ивановский государственный энергетический университет  
Кафедра теоретических основ теплотехники

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ТВЕРДОГО ТЕЛА  
МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**  
Методические указания по выполнению лабораторной работы  
по дисциплине "Тепломассообмен"

Иваново 2003

Составители: В.В.БУХМИРОВ,  
Т.Е. СОЗИНОВА,  
Г.Н. ЩЕРБАКОВА,  
А.В. ПЕКУНОВА  
Редактор А.А.ВАРЕНЦОВ

Методические указания предназначены для студентов, изучающих курс “Тепломассообмен” и “Теоретические основы теплотехники”. Методические указания содержат краткую теоретическую справку по изучаемому вопросу, описание лабораторного компьютерного стенда, методику проведения и обработки результатов эксперимента.

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ.

Рецензент  
кафедра теоретических основ теплотехники Ивановского государственного энергетического университета.

## 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 или кондукцией происходит вследствие взаимодействия микрочастиц вещества (молекул, атомов, свободных электронов и т.п.) в переменном температурном поле, под которым понимают совокупность значений температур в рассматриваемой области и во времени.

Таким образом, в неоднородном температурном поле теплопроводность имеет место в веществе любого фазового состояния — в газах, в 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, выполненного из фторопласта.

Перенос теплоты теплопроводностью выражается 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 градиент температуры рассчитывается 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 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 эксперименте будем достигать стационарного (не зависящего от времени) режима теплопроводности, поскольку в этом случае существенно упрощается измерение теплового потока и температурного поля.

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

$$t(x) = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} x, \quad (3)$$

где  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  – температуры на поверхностях плоской стенки, °С или К;  $\delta$  – толщина стенки, м.

В этом случае температурный градиент легко найти по формуле (2):

$$\text{grad}(t) = \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta}. \quad (4)$$

Тогда подставляя значение градиента температуры в формулу (1) получим

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}). \quad (5)$$

Из выражения (5) легко найти значение коэффициента теплопроводности, предварительно измерив тепловой поток и температуры на поверхностях плоской стенки:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{t_{c1} - t_{c2}}. \quad (6)$$

В этом случае найденное экспериментально значение коэффициента теплопроводности соответствует средней температуре плоской стенки

$$\bar{t} = 0,5(t_{c1} + t_{c2}).$$

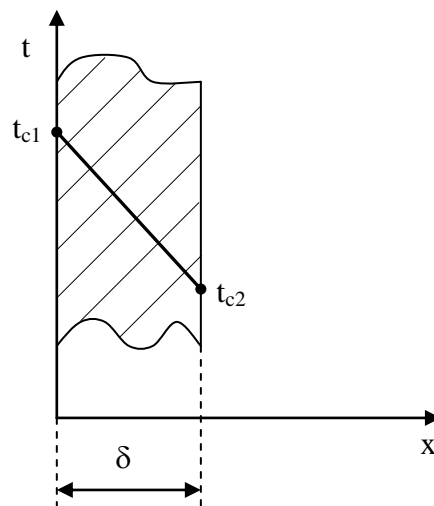


Рис.1. Одномерное температурное поле в плоской стенке

## Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис.2) состоит из пультов управления с смонтированными в них контрольно-измерительными приборами 1, системного блока с микропроцессором 2, клавиатуры 3, монитора 4, манипулятора "мышь" 5 и системы электрического питания 6. Экспериментальная установка работает по методу имитационного моделирования при помощи рабочей программы процесса, которая вводится в память микропроцессора. При проведении лабораторной работы одним из основных управляющих органов является клавиатура, которая служит для выбора режима исследования и ввода значений параметров. Результаты выполнения лабораторной работы демонстрируются на экране монитора.

В данной работе задействованы два пульта управления (рис. 3): пульт № 1 для управления электрическим нагревателем и пульт № 4 для измерения термоЭДС термопар.

Схема рабочего участка экспериментальной установки, система его питания и результаты измерений представлены на экране монитора и на рис. 4. 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. Измерение падения напряжения производится цифровым вольтметром, расположенным на пульте управления № 1 (рис. 3). Показания цифрового вольтметра дублируются индикатором V на экране монитора (рис.4). Высокая теплопроводность корпуса нагревателя и равномерное распределение обмотки нагревательного элемента обеспечивают постоянную температуру на поверхности нагревателя и, следовательно, на нагреваемых 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 I, из асбоцемента. Кожух выполнен в виде полого цилиндра с внутренним диаметром 164 мм и внешним диаметром 190 мм. Высота кожуха  $h_k = 22$  мм.

Температуры на поверхностях образцов измеряются хромель-копелевыми термопарами, подключенными через переключатель к цифровому индикатору на пульте № 4 (рис.3). Показания цифрового индикатора дублируются на экране монитора (рис.4). Многопозиционный переключатель позволяет последовательно измерять термоЭДС всех термопар (номера кно-

пок переключателя соответствуют номерам термопар). 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 °С.

Температура на обогреваемой и охлаждаемой поверхностях диска зависит 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. 5. В ходе эксперимента температура горячей (нагреваемой) поверхности уточняется по показаниям термопар 3÷6.

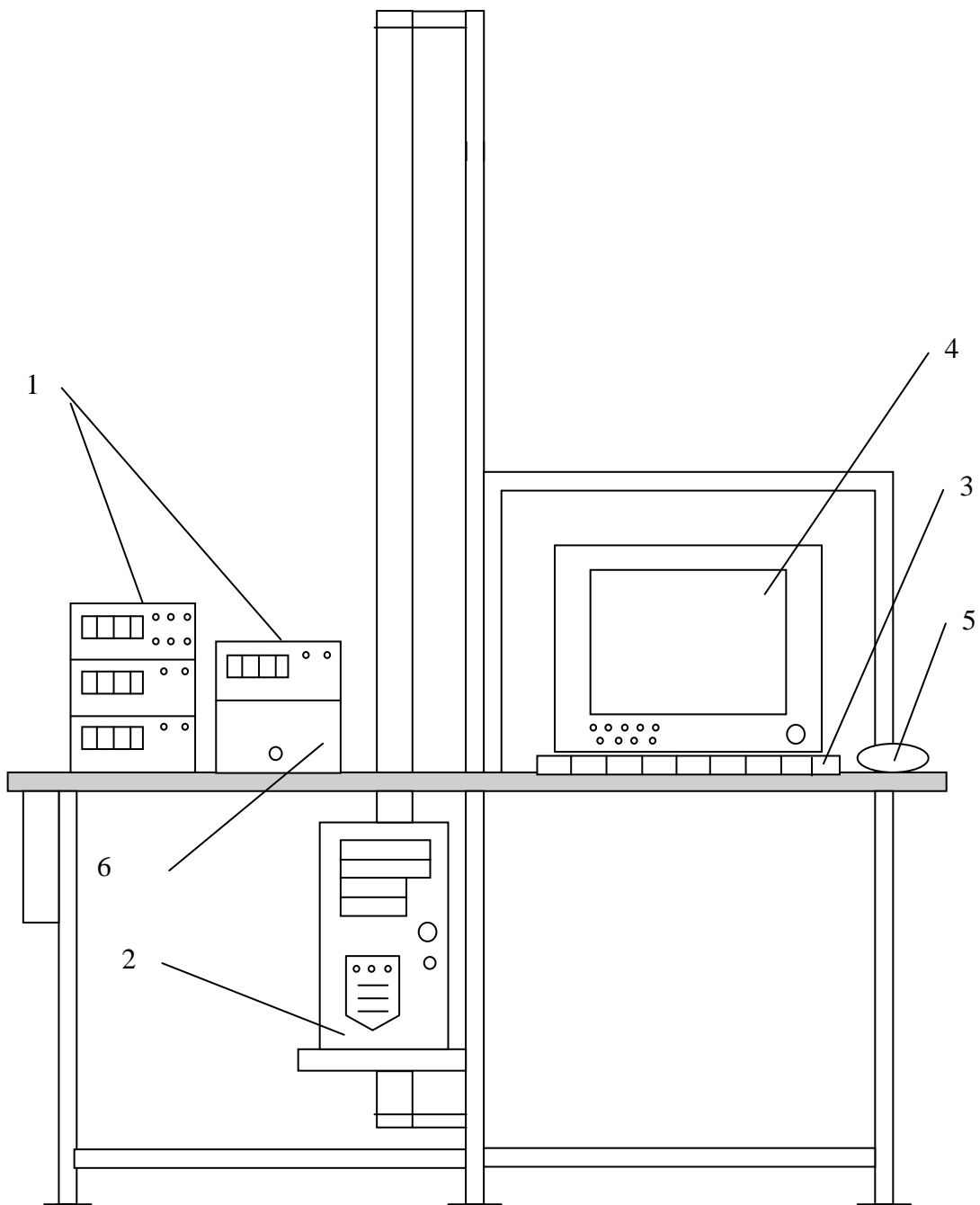


Рис.2. Экспериментальная установка

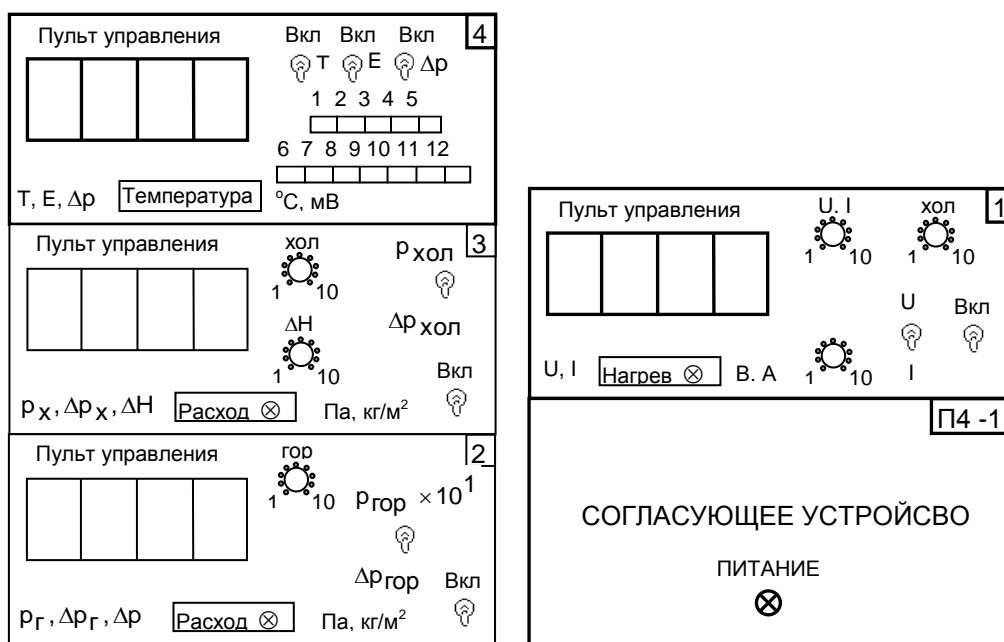


Рис. 3. Пульты управления

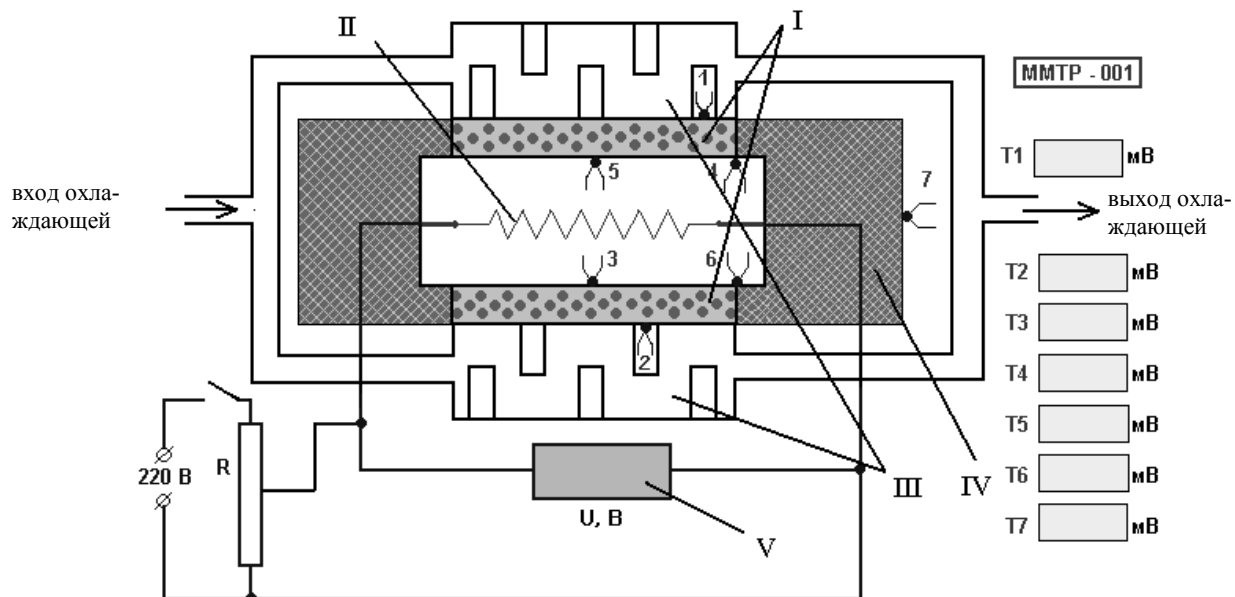


Рис.4. Рабочий участок экспериментальной установки



## Порядок проведения эксперимента

1. Включить установку в сеть 220 В.
2. Запустить программу C:\ТЕРМО\tp\_001.exe. При этом на экране монитора отобразится схема рабочего участка экспериментальной установки (рис.5).
3. Включить тумблер питания на пульте управления № 1 (рис.4).
4. Переключатель U/I (напряжение/сила тока), расположенный на пульте № 1, установить в положении U.
5. На пульте управления № 4 переключатель E перевести в положение "Вкл" (при этом переключатели T и ΔP должны находиться в положении "Выкл").
6. Установить заданное преподавателем значение температуры нагреваемой поверхности в меню "Параметры" (температура горячей поверхности изменяется в пределах от 50 до 100 °С).
7. По графику на рис. 5 определить необходимое для заданного режима теплопроводности напряжение на нагревателе. Установить данное напряжение при помощи ручки управления реостатом (пульт № 1), контролируя его значение по показаниям цифрового вольтметра пульта № 1 или по индикатору V на экране монитора. Зафиксировать в журнале наблюдений (табл. 1) значение напряжения U.
8. Переключая кнопки многопозиционного переключателя термопар на пульте № 4 зафиксировать в журнале наблюдений (табл. 1) значения термо-ЭДС. Показания цифрового индикатора пульта дублируются на экране монитора.
10. Для проведения следующего эксперимента с новым значением температуры горячей поверхности необходимо повторить все действия, начиная с п. 6. Количество экспериментов определяет преподаватель.

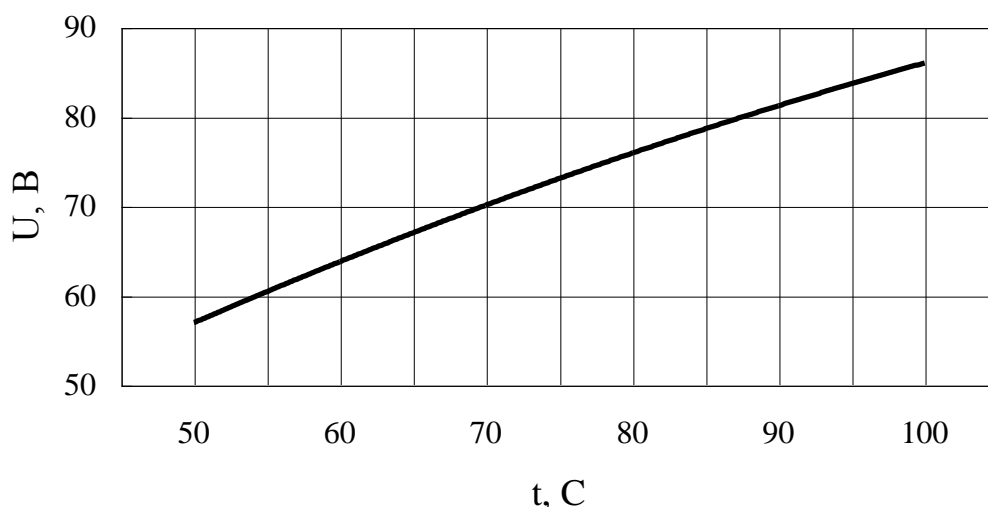


Рис.5. Зависимость напряжения электронагревателя от температуры горячей поверхности образца

Табл.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  $t_{c1}$  и среднюю температуру холодной (наружной) поверхности  $t_{c2}$  исследуемых фторопластовых образцов:

$$t_{c1} = \frac{t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{4}, \quad (7)$$

$$t_{c2} = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (8)$$

3. Найти среднюю по толщине температуру исследуемого образца:

$$t_{cp} = \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}. \quad (9)$$

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

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

5. Определить тепловые потери через кожух цилиндрической формы по формуле:

$$Q_{пот} = \frac{5\pi\lambda_k}{2} \left( \frac{d_H + d_K}{d_K - d_H} \right) (h_H + h_K)(t_{c1} - t'_{c2}), \quad (11)$$

где  $t'_{c2}$  – температура наружной поверхности кожуха (определяется по показанию 7-й термопары),  $\lambda_k = 0,08$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности материала кожуха (асбоцемента);  $d_H = 0,146$  м – наружный диаметр нагревателя;  $d_K = 0,19$  м – внешний диаметр кожуха;  $h_H = 0,012$  м – высота нагревателя;  $h_K = 0,022$  м – высота кожуха.

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

$$Q = Q_H - Q_{пот}. \quad (12)$$

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

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

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

Табл. 2. Результат обработки экспериментальных данных

№ опыта	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>w1</sub>	t <sub>w2</sub>	t <sub>ср</sub>	λ
1											
2											
⋮											
N											

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

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

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

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

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

решая которую несложно получить:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_2 - \lambda_1 \frac{t_{ср,2}}{t_{ср,1}}}{1 - \frac{t_{ср,2}}{t_{ср,1}}}, \quad b = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0 t_{ср,1}}. \quad (16)$$

При проведения 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.

Табл.3. Градуировочная таблица для хромель-копелевых термопар

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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 при стационарном тепловом потоке в случае, когда коэффициент теплопроводности  $\lambda$  не зависит от температуры?
4. Дайте объяснение понятиям: тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, линейная плотность теплового потока; приведите их единицы.
5. Охарактеризуйте процесс теплопроводности.
6. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.
7. Что называется коэффициентом теплопроводности?
8. Напишите дифференциальное уравнение теплопроводности для пластины.
9. В чем заключаются условия однозначности. С какой целью они задаются?
10. Какие известны способы задания граничных условий для дифференциального уравнения теплопроводности? Перечислить и дать краткое определение.
11. Какова 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 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. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.- 416 с.
2. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973.- 320 с.
3. **Краснощеков Е.А., Сукомел А.С.** Задачник по теплопередаче. М.: Энергия, 1981.- 240 с.

## Содержание

1. Задание	3
2. Введение	3
3. Экспериментальная установка	5
4. Порядок проведения эксперимента	9
5. Обработка результатов эксперимента	11
6. Контрольные вопросы	14
7. Библиографический список	15

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

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
по дисциплины "Тепломассообмен"

Составители БУХМИРОВ Вячеслав Викторович  
СОЗИНОВА Татьяна Евгеньевна  
ЩЕРБАКОВА Галина Наумовна  
ПЕКУНОВА Анна Витальевна

Редактор Н.Б. Михалева  
Лицензия ЛР №020264 от 15.12.96 г.

Подписано в печать                      Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать плоская. Усл.печ.л. 2. Тираж 100 экз. Заказ.  
Ивановский государственный энергетический университет, 153003, г.  
Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Отпечатано в ОМТ МИБИФ.