

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ТВЁРДЫХ ТЕЛ
МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Иваново 2016

Составители: В.В. БУХМИРОВ
А.К. ГАСЬКОВ

Редактор Т.Е. СОЗИНОВА

Методические указания содержат краткую теоретическую справку по изучаемой теме, описание лабораторных стендов, методику проведения и обработки результатов эксперимента.

Предназначены для студентов дневного и заочного факультетов, обучающихся по направлению 140100 «Теплотехника и теплоэнергетика», 141100 «Энергетическое машиностроение», 140700 «Ядерная энергетика и теплофизика».

Утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ.

Рецензент

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович
ГАСЬКОВ Александр Константинович

Редактор Т.В. Соловьёва

Подписано в печать Формат 60x84¹/₁₆
Печать плоская. Усл. печ. л. 0,69. Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ
153003, г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

ЗАДАНИЕ

1. Экспериментально определить коэффициент теплопроводности текстолита или фторопласта методом цилиндрического слоя.
2. Сравнить результаты эксперимента со справочными данными.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Теплопроводность (кондукция) – способ передачи теплоты за счёт взаимодействия микрочастиц тела (атомов, молекул, ионов в электролитах и электронов в металлах) в переменном поле температур. Теплопроводность происходит в твёрдых, жидких и газообразных телах. В твёрдых телах теплопроводность является единственным способом передачи теплоты. В вакууме теплопроводность отсутствует [1].

Связь между тепловым потоком и градиентом температурного поля устанавливает закон Фурье:

$$\vec{Q} = -\lambda \operatorname{grad}(T)F, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\operatorname{grad}(T)$ – градиент температурного поля, град/м; F – площадь поверхности теплообмена, м².

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

Коэффициент теплопроводности λ характеризует способность данного тела (вещества) проводить тепло и является одной из основных теплофизических величин, используемых при решении задач теплообмена. Коэффициент теплопроводности зависит от многих величин: температуры, давления, влажности, структуры материала. Аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности для различных веществ от физических параметров не установлена, поэтому коэффициент теплопроводности определяют экспериментально и его значение приводится в справочниках в зависимости от температуры.

В стационарном режиме теплопроводности, при допущении, что коэффициент теплопроводности не зависит от температуры ($\lambda \neq f(T)$), распределение температурного поля по толщине цилиндрической стенки описывается уравнением:

$$T(r) = T_{w1} - (T_{w1} - T_{w2}) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (2)$$

где T_{w1} и T_{w2} – температуры на внутренней и наружной поверхностях цилиндрической стенки, °С или К; r – текущая координата ($r_1 \leq r \leq r_2$),

м; r_1 , r_2 – радиусы внутренней и наружной поверхности цилиндрической стенки соответственно, м.

Температура в цилиндрической стенке изменяется по закону логарифма (рис. 1).

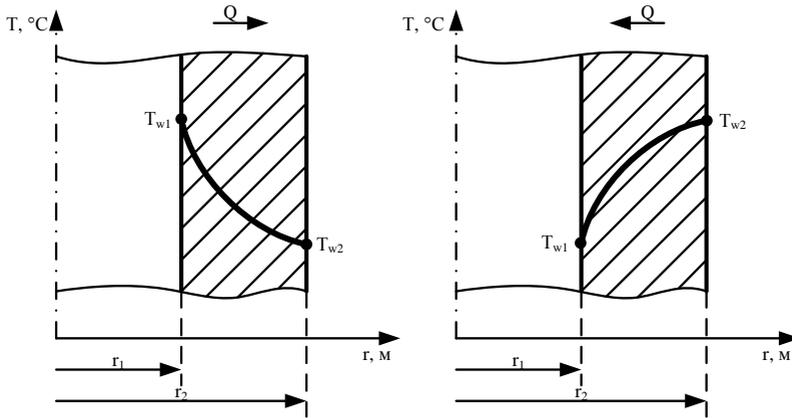


Рис. 1. Температурное поле в цилиндрической стенке:
а – $T_{w1} > T_{w2}$; б – $T_{w1} < T_{w2}$

Дифференцируя уравнение (2) по координате, получим выражение для расчёта градиента температурного поля в цилиндрической стенке:

$$\text{grad}(T) = \frac{dT(r)}{dr} = -\frac{(T_{w1} - T_{w2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{r} \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в уравнение Фурье (1), получим зависимость для расчёта теплового потока через цилиндрическую стенку в стационарном режиме теплообмена:

$$Q = -\lambda \left(-\frac{(T_{w1} - T_{w2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{r} \right) F = \frac{2\pi l \lambda (T_{w1} - T_{w2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (4)$$

где $F = 2\pi r l$ – площадь боковой поверхности цилиндра, м^2 ; l – длина цилиндра, м.

Выражение (4) используют для определения коэффициента теплопроводности материалов методом цилиндрического слоя. Зная геометрию образца, температуры на внутренней и внешней границах цилиндрического слоя и величину теплового потока, проходящего через ци-

линдрическую стенку, можно определить коэффициент теплопроводности материала по формуле:

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (T_{w1} - T_{w2})}, \quad (5)$$

где d_1 , d_2 – диаметры внутренней и наружной поверхности цилиндрической стенки соответственно, м.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В лаборатории кафедры ТОТ ИГЭУ установлены два экспериментальных стенда по определению коэффициента теплопроводности твёрдого материала методом цилиндрического слоя. Устройство и принципы действия экспериментальных стендов аналогичны, поэтому их описание и порядок выполнения экспериментов на обоих стендах совпадают. Экспериментальные установки отличаются друг от друга геометрией рабочего участка и типом исследуемого материала. Характеристики экспериментальных установок приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики экспериментальных установок

№ п/п	Характеристика	Обозначение	Экспериментальная установка	
			№1	№2
1	Исследуемый материал	-	Текстолит	Фторопласт №4
2	Вид тока на нагревателе	-	Постоянный	Переменный
3	Максимально допустимое напряжение на нагревателе	U_n^{\max} , В	25	40
4	Величина образцового сопротивления	R_0 , Ом	0,1	1
5	Наружный диаметр образца	d_2 , мм	34	41
6	Внутренний диаметр образца	d_1 , мм	22	25

Продолжение табл. 1

№ п/п	Характеристика	Обозначение	Экспериментальная установка	
			№1	№2
7	Длина образца	l, мм	384	360
8	Справочное значение коэффициента теплопроводности [2,3]	$\lambda_{\text{табл}}$, Вт/(м·К)	0,23±0,34	0,25

Внешний вид обеих экспериментальных установок изображён на рис. 2. На передней панели стенда расположены:

- 1 – источник питания нагревателя с регулятором напряжения;
- 2 – тумблер включения электропитания установки;
- 3 – тумблер включения нагревателя;
- 4 – измеритель температуры типа УТК-38;
- 5 – тумблер включения измерителя температуры;
- 6 – вольтметр;
- 7 – тумблер переключения вольтметра для измерения напряжения на нагревателе (U_n) и падения напряжения на образцовом сопротивлении (U_0).

На рис. 3 приведена принципиальная схема рабочего участка стенда. На цилиндрическом нагревателе 1 расположена медная термостатирующая трубка 2, на наружную поверхность которой надет образец 3 из исследуемого материала. Для уменьшения вертикальных конвективных потоков воздуха около нагретого образца на рабочем участке установлены тонкие пластины 4 перпендикулярно восходящему потоку воздуха. Для уменьшения тепловых потерь на торцы нагревателя надеты теплоизолирующие втулки 5 из пенопласта.

Электропитание к нагревателю подводится от источника питания 1 (рис. 2). Последовательно с нагревателем в электрическую схему питания включено образцовое сопротивление R_0 (рис. 3) для измерения силы электрического тока, проходящего через нагреватель.

На внутренней и наружной поверхностях исследуемого образца расположены шесть хромель-копелевых термопар (по три термопары на каждой поверхности), при помощи которых измеряют температуры в трёх сечениях по высоте образца. Термопары подключены к измерительному прибору УТК-38 в следующей последовательности:

- 1 канал – температура внутренней поверхности в сечении I (T_{11});
- 2 канал – температура наружной поверхности в сечении I (T_{21});
- 3 канал – температура внутренней поверхности в сечении II (T_{12});
- 4 канал – температура наружной поверхности в сечении II (T_{22});
- 5 канал – температура внутренней поверхности в сечении III (T_{13});
- 6 канал – температура наружной поверхности в сечении III (T_{23}).

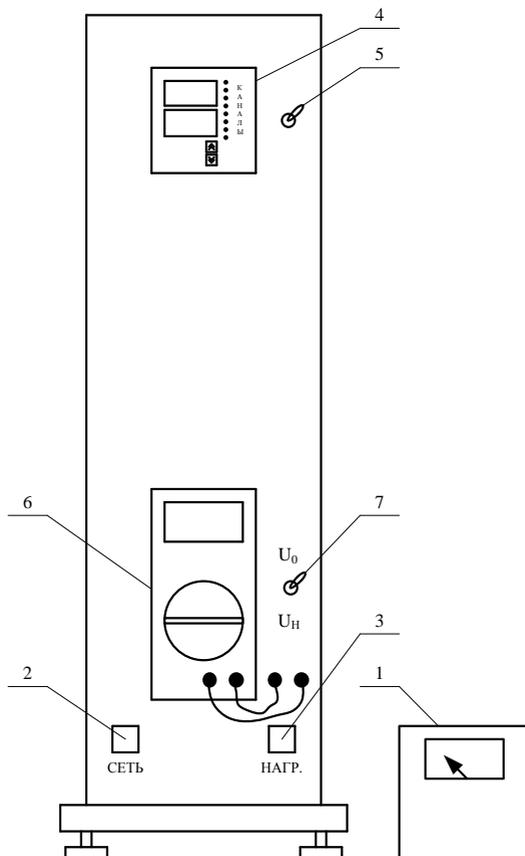


Рис. 2. Экспериментальная установка (внешний вид):

1 – источник питания нагревателя с регулятором напряжения; 2 – тумблер включения электропитания установки; 3 – тумблер включения нагревателя; 4 – измеритель температуры типа УТК-38; 5 – тумблер включения измерителя температуры; 6 – вольтметр; 7 – переключатель вольтметра

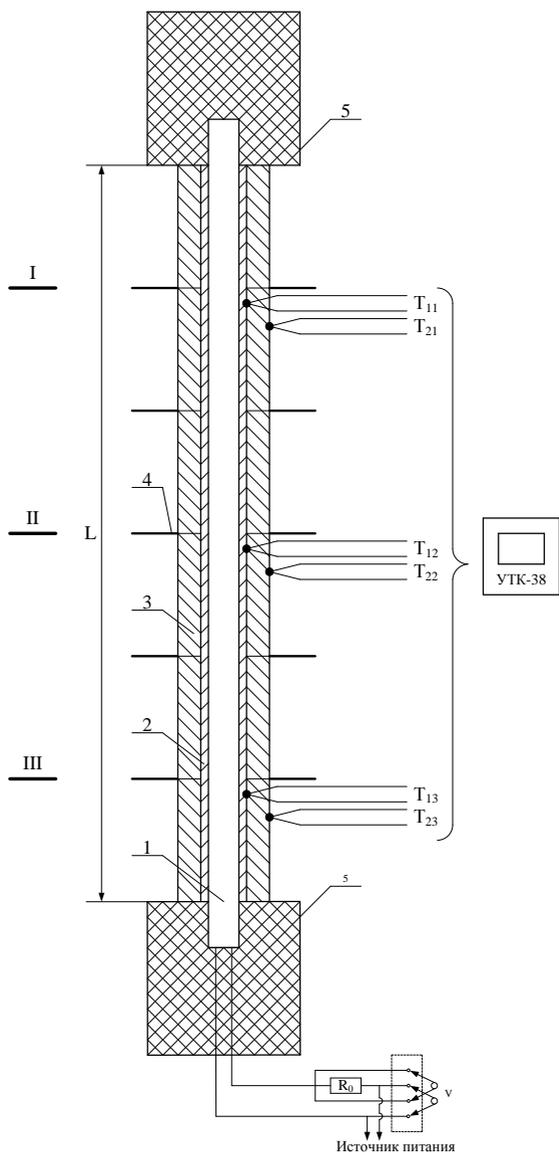


Рис. 3. Принципиальная схема рабочего участка:

1 – нагреватель; 2 – медная термостатирующая трубка; 3 – исследуемый образец; 4 – пластины для уменьшения конвективных потоков; 5 - теплоизолирующие втулки

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изучить устройство экспериментальной установки и методику проведения опыта.
2. Подготовить журнал наблюдений.
3. О готовности к проведению эксперимента сообщить преподавателю.

Внимание! Пункты 4-9 выполняет преподаватель или инженер.

4. Включить электропитание установки при помощи тумблера 2.
5. Включить измеритель температуры при помощи тумблера 5.
6. Выставить на вольтметре вид измеряемого напряжения (постоянное или переменное) в зависимости от типа экспериментальной установки (см. табл. 1).
7. Перевести регулятор напряжения на источнике питания в минимальное положение.
8. Переключить тумблер 7 в положение « U_n ».
9. Включить питание нагревателя тумблером 3.
10. Регулятором напряжения выставить значение напряжения, подаваемого на нагреватель, ориентируясь на показания вольтметра 6. При этом уровень напряжения не должен превысить допустимое значение (см. табл. 1).
11. Записать показания вольтметра « U_n » в журнал наблюдений.
12. Переключить тумблер 7 в положение « U_0 » для измерения падения напряжения на образцовом сопротивлении. Записать показания вольтметра в журнал наблюдений.
13. Записать значения температур с экрана измерителя 4.
 - а) на экспериментальной установке №1 при помощи нажатия кнопок переключения измерительных каналов «вверх» и «вниз»;
 - б) на экспериментальной установке №2 переключение между измерительными каналами происходит в автоматическом режиме.
14. Каждые 5÷10 минут (по указанию преподавателя) записывать показания всех приборов в журнал наблюдения до достижения стационарного режима теплообмена, который характеризуется неизменными значениями температуры в течение трёх измерений.

Таблица 2. Журнал наблюдений

№	$U_n, В$	$U_0, В$	Показания измерительного прибора УТК-38					
			T_{11}	T_{21}	T_{12}	T_{22}	T_{13}	T_{23}
1								
...								
N								

Экспериментальная установка №2 подключена к ноутбуку, на котором реализована возможность автоматического сбора и обработки экспериментальных данных. Сбор и обработку данных проводят в следующем порядке:

1. Выполнить пункты 4-9 порядка проведения эксперимента.
2. На рабочем столе ноутбука запустить программу «Теплопроводность в цилиндрическом слое.xls». На экране появится рабочее окно программы, изображённое на рис. 4.
3. Если в строке состояния появится предупреждение системы безопасности «Запуск активного содержимого отключён», то, кликнув указателем мыши по кнопке «Параметры», в открывшемся окне разрешить запуск макросов, выделив пункт «Включить это содержимое» и нажав «ОК».
4. При помощи нажатия активной кнопки «Подключить приборы» установить связь программы с измерителем температур УТК-38. В этом случае температуры в контрольных точках автоматически записываются в соответствующие ячейки электронного журнала наблюдения (E15÷J15).
5. Переключая тумблер 7 в положения « U_H » и « U_0 », записать показания вольтметра в ячейки C15 и D16 набором с клавиатуры вручную либо при помощи ползунков, отображаемых в соответствующих ячейках.
6. В поле «Расчётные величины» отображаются: тепловой поток через цилиндрическую поверхность Q , средние температуры внутренней (T_{w1}) и наружной (T_{w2}) поверхностей.
7. Нажатием активной кнопки «Записать результаты измерения» зафиксировать показания датчиков в таблице «Результаты измерения». Повторять данный пункт до достижения стационарного процесса теплообмена, который характеризуется неизменными значениями температуры в течение трёх измерений.

The screenshot shows a spreadsheet application window titled "Предупреждение системы безопасности" (Security warning) with a subtitle "Запуск активного содержимого отключен" (Active content blocked). The spreadsheet contains several tables and buttons. Buttons for "Подключить приборы" (Connect devices) and "Записать результат измерения" (Save measurement result) are visible. The main data area is divided into three sections: "Текущие значения параметров" (Current parameter values), "Расчётные величины" (Calculated values), and "Результаты измерений" (Measurement results).

Текущие значения параметров									Расчётные величины		
U_H	U_0	T_{11}	T_{21}	T_{12}	T_{22}	T_{13}	T_{23}	Q	T_{w1}	T_{w2}	
В	В	°C	°C	°C	°C	°C	°C	Вт	°C	°C	
27,29	0,492	60,3	51,7	60,2	50,2	58,4	49,6	13,4	59,6	50,5	

Результаты измерений											
№	U_H	U_0	T_{11}	T_{21}	T_{12}	T_{22}	T_{13}	T_{23}	Q	T_{w1}	T_{w2}
-	В	В	°C	°C	°C	°C	°C	°C	Вт	°C	°C
1	27,29	0,492	54,2	46,5	54,2	45,3	52,8	44,9	13,4	53,7	45,6
2	27,29	0,492	60,0	51,5	59,9	50,0	58,0	49,3	13,4	59,3	50,3

Рис. 4. Рабочее окно программы

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Рассчитать среднюю температуру горячей (внутренней) поверхности исследуемого образца:

$$T_{w1} = \frac{T_{11} + T_{12} + T_{13}}{3}. \quad (6)$$

2. Рассчитать среднюю температуру холодной (наружной) поверхности исследуемого образца:

$$T_{w2} = \frac{T_{21} + T_{22} + T_{23}}{3}. \quad (7)$$

3. Определить тепловой поток через цилиндрическую поверхность. В стационарном режиме теплообмена тепловой поток равен электрической мощности нагревателя:

$$Q = N_{эл} = U_n \cdot I = U_n \cdot \frac{U_0}{R_0}, \quad (8)$$

где U_n – напряжение, подаваемое на нагреватель, В; U_0 – падение напряжения на образцовом сопротивлении, В; R_0 – величина образцового сопротивления (см. табл. 1), Ом.

3. Определить коэффициент теплопроводности по формуле (5).

4. Найти среднее значение коэффициента теплопроводности для серии опытов по формуле:

$$\lambda_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{N}, \quad (9)$$

где λ_i – значение коэффициента теплопроводности в i -ом опыте, Вт/(м·К); N – количество опытов.

5. Сравнить экспериментально полученный коэффициент теплопроводности исследуемого материала со значением коэффициента теплопроводности из справочной литературы. Определить погрешность экспериментального определения коэффициента теплопроводности по формуле:

$$\gamma = \frac{|\lambda_{табл} - \lambda_{ср}|}{\lambda_{табл}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где $\lambda_{табл}$ – справочное значение коэффициента теплопроводности (см. табл. 1), Вт/(м·К).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение температурного поля. Назовите характеристики температурного поля.
2. Опишите одномерное стационарное температурное поле в неограниченном цилиндре. Дайте его графическое изображение.
3. Как изменяется градиент температуры по толщине цилиндрической стенки при стационарном тепловом потоке в случае, когда коэффициент теплопроводности не зависит от температуры?
4. Дайте объяснение понятиям: тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, линейная плотность теплового потока; приведите их единицы измерения.
5. Охарактеризуйте процесс теплопроводности.
6. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.
7. Что характеризует коэффициент теплопроводности?
8. Напишите дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат в стационарном режиме.
9. Назовите способы задания граничных условий для решения дифференциального уравнения теплопроводности? Перечислите и дайте их краткое определение.
10. Укажите связь между коэффициентом теплопроводности, коэффициентом температуропроводности и удельной объемной теплоемкостью материала?
11. Поясните принцип работы экспериментальной установки и назначение отдельных элементов установки.
12. Перечислите приборы, установленные на стенде и дайте характеристику измеряемых величин, указав их единицы измерения.
13. Опишите порядок обработки экспериментальных данных для определения коэффициента теплопроводности.
14. С какой целью при проведении эксперимента необходимо достигать стационарного режима теплопроводности?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бухмиров, В.В.** Тепломассообмен: учеб. пособие/В.В. Бухмиров; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.
2. **Бухмиров, В.В.** Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен»/В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова; ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 102 с.
3. **ГОСТ 10007-80** «Фторопласт-4. Технические условия»