

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра теплоэнергетики

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ**

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине  
«Тепломассообмен» для студентов направления  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
по дисциплине «Теплотехника» для студентов направления  
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и  
комплексов», профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство», и  
специальности 21.05.04.00 «Горное дело», специализация 21.05.04.10  
«Электрификация и автоматизация горного производства»,  
всех форм обучения

Составители Е. Ю. Темникова  
В. Н. Сливной  
С. А. Шевырев

Рассмотрены и утверждены  
на заседании кафедры ТЭ  
Протокол № 5 от 09.12.2015 г.  
Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
направления 13.03.01  
Протокол № 5 от 09.12.2015 г.  
Электронная копия  
находится в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2016

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является получение практических навыков экспериментального определения коэффициента теплопроводности методом неограниченного цилиндрического слоя (методом трубы), а также закрепление знаний по основам теории теплопроводности.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Существует три способа передачи тепла – конвекцией, теплопроводностью и тепловым излучением.

*Теплопроводность* – это перенос тепловой энергии структурными частицами вещества (молекулами, атомами, ионами) в процессе их теплового движения. Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур. Явление теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, которая определяет температуру тела, передается другому телу при их взаимодействии или передается из более нагретых областей тела к менее нагретым областям.

Механизм распространения тепла теплопроводностью зависит от физических свойств тела, его агрегатного состояния. В газах и жидкостях он происходит путем соударения частиц между собой, а также посредством диффузии молекул и атомов. В металлах теплопроводность осуществляется в результате диффузии свободных электронов и частично – упругих колебаний кристаллической решетки. В твердых телах – диэлектриках, в основном, за счет упругих колебаний кристаллической решетки.

Процесс теплопроводности (как и другие виды теплообмена) может иметь место лишь тогда, когда в различных точках тела температура неодинакова. В общем случае процесс передачи тепла теплопроводностью в твердом теле сопровождается изменением температуры в пространстве и во времени.

Значение температуры в любой точке пространства, определяемой координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  в каждый момент времени  $\tau$  может быть описано уравнением

$$t = t(x, y, z, \tau),$$

которое представляет собой математическое выражение температурного поля в его наиболее общем виде, когда температура меняется вдоль всех координатных осей, а также с течением времени. Такое температурное поле называют трехмерным нестационарным. *Температурное поле* – совокупность значений температуры во всех точках изучаемого пространства для каждого момента времени.

Если  $\partial t / \partial \tau = 0$ , то температура каждой точки с течением времени не изменяется, то такое поле называется *трехмерным стационарным*, т.е.

$$t = t(x, y, z).$$

Целью решения задач теплопроводности является определение температурного поля.

Если соединить точки тела, имеющие одинаковую температуру, то получим поверхность равных температур – *изотермическую поверхность* – геометрическое место точек с одинаковой температурой.

Свойства изотермических поверхностей: в однородном изотропном теле изотермические поверхности непрерывны; изотермические поверхности не пересекаются.

Для того чтобы оценить, насколько резко меняется температура внутри тела, пользуются понятием температурного градиента (скалярная величина) [К/м]:

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n}.$$

*Температурный градиент* – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону роста температуры.

Тепловой поток передается в обратном направлении. В случае стационарного температурного поля количество тепла (Вт), переданного в единицу времени путем теплопроводности через площадь, перпендикулярную градиенту температуры, описывается простым уравнение, предложенным **Фурье** в 1822 г.:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dn} F.$$

В практике теплотехнических расчетов широко пользуются понятием плотности теплового потока [Вт/м<sup>2</sup>]

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \frac{dt}{dn}.$$

Тепло, в соответствии со вторым началом термодинамики, самопроизвольно передается лишь в направлении убывания температуры, что объясняет знак «минус».

Коэффициент  $\lambda$ , входящий в эти уравнения, носит название коэффициента теплопроводности. Физический смысл и единицы измерения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  можно определить, выразив из уравнения и получив

$$\lambda = \frac{-Q}{\frac{dt}{dn} F} = \left[ \frac{\text{Вт}}{\frac{\text{К}}{\text{м}} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{К}}{\text{м}}} \right].$$

*Коэффициент теплопроводности* – теплофизическое свойство вещества, характеризует способность вещества проводить теплоту в единицу времени через единицу площади, перпендикулярную  $grad t$ , при его значении равным 1.

Для различных веществ коэффициент теплопроводности  $\lambda$  различен и зависит от структуры вещества, влажности, давления и температуры.

Для большинства материалов в нешироком диапазоне температур зависимость коэффициента теплопроводности от температуры может быть описана линейной функцией вида

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta t)$$

здесь  $\lambda$  и  $\lambda_0$  – соответственно коэффициенты теплопроводности при данной температуре  $t$  и при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\beta$  – температурный коэффициент.

Наибольшую величину имеет коэффициент теплопроводности металлов, для которых  $\lambda \approx 20 \div 400 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Из металлов наиболее теплопроводным является серебро с коэффициентом теплопроводности  $\lambda \approx 420 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , затем идут чистая медь  $\lambda \approx 395 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , золото  $\lambda \approx 311 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  и т.д. Для большинства металлов рост температуры приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности. Следует отметить, что для сплавов, в отличие от чистых металлов, характерно увеличение коэффициент теплопроводности с повышением температуры.

Величина коэффициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов-диэлектриков во много раз меньше, чем у металлов и составляет  $\lambda \approx 0,02 \div 3$  Вт/(м·К). Для подавляющего большинства из них с ростом температуры  $\lambda$  увеличивается. Вещество называют *тепловым изолятором* если  $\lambda < 0,25$  Вт/(м·К).

Коэффициент теплопроводности жидкостей лежит в пределах  $0,07 \div 0,7$  Вт/(м·К). При этом для подавляющего большинства жидкостей с повышением температуры  $\lambda$  убывает. Исключение составляет вода и глицерин.

Коэффициент теплопроводности газов еще ниже  $\lambda \approx 0,006 \div 0,6$  Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности газов растет с повышением температуры. Коэффициент теплопроводности газов от давления практически не зависит, исключение составляет  $\lambda$  при очень малых и очень больших значениях давления. Следует иметь в виду, что для смеси газов (дымовые газы, атмосфера термических печей и т.п.) расчетным путем определить  $\lambda$  невозможно. Поэтому при отсутствии справочных данных достоверная величина  $\lambda$  может быть найдена лишь опытным путем.

Закон распределения температуры в дифференциальной форме для твердых изотропных тел без внутренних источников теплоты выглядит как:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

где  $\tau$  – время;  $x, y, z$  – координаты точки тела;  $t$  – температура этой точки в данный момент времени;  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$  – коэффициент температуропроводности;  $c, \rho$  – удельная теплоемкость и плотность вещества.

Существует несколько экспериментальных методов определения коэффициента теплопроводности при стационарном режиме. К ним относятся: 1) метод плоского слоя; 2) метод неограниченного цилиндрического слоя (используется в данной работе); 3) метод электротепловой аналогии (ЭТА).

В методе неограниченного цилиндрического слоя образцу придается форма цилиндрической полой трубы (например, на рис. 1 приведена схема экспериментальной установки).

Для того, чтобы максимально приблизиться к одномерной задаче, длина трубы  $l$  должна быть во много раз больше диаметра  $d$ . Чем больше отношение  $l/d$ , тем более обосновано предположение о том, что вся теплота передается в радиальном направлении. Расчетная формула в случае граничных условий 1-го рода имеет вид

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{d_H}{d_B}}{2\pi l (t_{C1} - t_{C2})},$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $l$  – длина образца, м;  $d_B$ ,  $d_H$  – соответственно внутренний и наружный диаметры образца, м;  $t_{C1}$ ,  $t_{C2}$  – значения температур внутренней и наружной поверхностей образца, °С.

### **3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Установка для определения коэффициента теплопроводности (рис. 1) состоит из асбестовой трубы 1, закрытой с торцов заглушками 2 для исключения потоков теплоты в осевом направлении. Внутри трубы вмонтирован электрический нагреватель 3, мощность которого определяется по показаниям амперметра 6 и вольтметра 7. Для изменения потребляемой мощности нагревателя имеется лабораторный автотрансформатор. Выделяемое нагревателем тепло отдается в окружающую среду через стенки трубы в радиальном направлении.

Температура внутренней и наружной поверхности трубы измеряется с помощью термомпар 4 и мультиметра 5.

Порядок выполнения работы следующий. Включается в сеть автотрансформатор 6 (рис. 1) и на нагревательном элементе 3 устанавливается величина силы тока  $I$  (по указанию преподавателя или лаборанта).

При достижении установившегося теплового режима (что может занять значительный промежуток времени) фиксируются и

заносятся в табл. 1 значения следующих величин: силы тока  $I$ , напряжения  $U$ , показания термомпар  $t_{C1}$ ,  $t_{C2}$ .

Затем величину силы тока  $I$  изменяют с помощью лабораторного трансформатора, вновь дожидаются установления стационарного теплового режима и опять снимают показания величин  $I$ ,  $U$ ,  $t_{C1}$ ,  $t_{C2}$ .

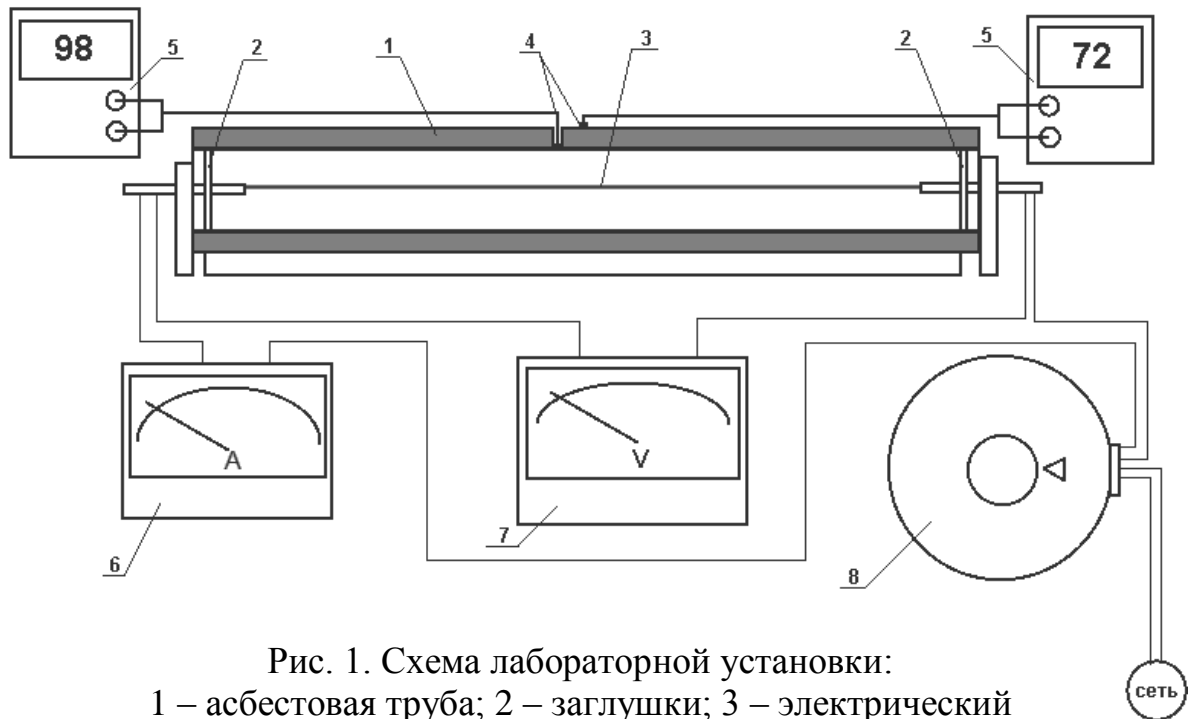


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

1 – асбестовая труба; 2 – заглушки; 3 – электрический нагреватель; 4 – термомпара; 5 – мультиметр; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – автотрансформатор

Основные размеры асбестовой трубы приведены в табл. 2.

Таблица 1

$I$	$U$	$Q$	$t_{C1}$	$t_{C2}$	$\lambda$	$r_1$	$r_2$	$t_1$	$T_2$
А	В	Вт	°С	°С	Вт/(м·К)	м	м	°С	°С

Таблица 2

Наименование	Обозначение, ед. изм.	Значение
Внутренний радиус	$r_B$ , м	0,045
Наружный радиус	$r_H$ , м	0,055
Длина	$l$ , м	0,655

#### 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определяют мощность нагревательного элемента, Вт

$$Q = UI.$$

2. Вычисляют значение коэффициента теплопроводности материала трубы

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{r_{II}}{r_B}}{2\pi l (t_{C1} - t_{C2})}.$$

3. Используя полученные значения  $Q$ ,  $\lambda$ ,  $t_{C1}$ ,  $t_{C2}$ , рассчитывают температуры  $t_I$  и  $t_{II}$  изотермических поверхностей, имеющих радиусы  $r_I$  и  $r_{II}$  (задаются преподавателем)

$$t_I = t_{C1} - \frac{Q}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r_I}{r_B},$$

$$t_{II} = t_{C1} - \frac{Q}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r_{II}}{r_B}.$$

4. Результаты вычислений заносятся в табл. 1.

5. Строится график изменения температуры по толщине стенки  $t = f(r)$ , пример см. рис. 2.

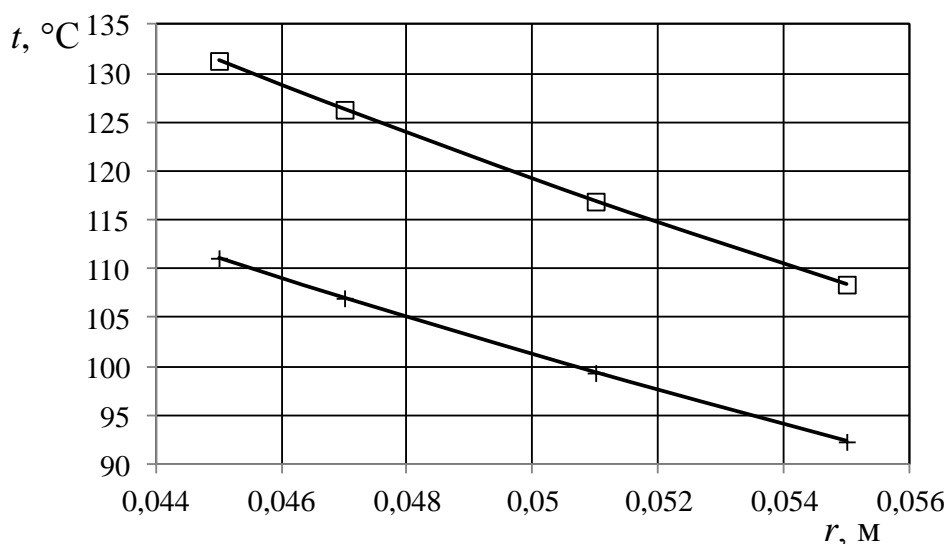


Рис. 2. Изменение температуры по толщине стенки трубы

#### 5. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. К работе допускаются студенты, прошедшие общий инструктаж по технике безопасности.



2. Следить, чтобы параметры электрической нагрузки (напряжение и сила тока) не превышали предельных значений, указанных на пультах установок или преподавателем.

3. Не оставлять без присмотра установку, находящуюся под напряжением.

4. При появлении пробоев изоляции, запаха гари и т.п. немедленно прекратить работу на установке и позвать преподавателя или лаборанта.

## **6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет оформляется на листах формата А4 с рамками и штампами и должен содержать:

- 1) титульный лист установленной формы;
- 2) цель работы, кратко изложенные теоретические положения,
- 3) принципиальную схему лабораторного стенда с основными техническими параметрами;
- 4) таблицу измеренных и рассчитанных величин;
- 5) обработку результатов опыта;
- 6) график зависимости  $t = f(r)$ ;
- 7) выводы по работе.

Чертежи, схемы и таблицу следует оформлять в соответствии с действующими стандартами и ГОСТами.

## **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое коэффициент теплопроводности?
2. Дифференциальное уравнение теплопроводности.
3. Условие однозначности для процесса теплопроводности.
4. Граничные условия, способы их задания.
5. Уравнения для определения теплового потока через плоскую и цилиндрическую стенку.
6. Тепловая проводимость и термическое сопротивление стенки.

## **8. ЛИТЕРАТУРА**

1. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Альянс, 2005. – 753 с.

Составители  
Елена Юрьевна Темникова  
Виктор Николаевич Сливной  
Сергей Александрович Шевырев

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА  
МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ**

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине  
«Тепломассообмен» для студентов направления  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
по дисциплине «Теплотехника» для студентов направления  
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и  
комплексов», профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство»,  
и специальности 21.05.04.00 «Горное дело», специализация 21.05.04.10  
«Электрификация и автоматизация горного производства»,  
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 29.02.2016. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 0,5.

Тираж 20 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.