

*Проект «Инженерные кадры Зауралья»*

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине: «Теплотехника»  
для студентов направления 190600.62

Курган 2014

Кафедра энергетики и технологии металлов

Дисциплина: «Теплотехника»  
(направление 190600.62).

Составил: канд. техн. наук, доц. В.А. Савельев.

Утверждены на заседании кафедры «26» октября 2013 г.

Рекомендованы методическим советом университета в рамках проекта  
«Инженерные кадры Зауралья» «22» ноября 2013 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации происходит взаимодействие транспортных средств с окружающей средой и между элементами их конструкций. На транспорте широкое распространение получили тепловые машины, выделяющие большое количество тепловой энергии, которую в одних случаях нужно отводить, а в других – сохранять с помощью различных материалов. Для этого необходимо знать теплопроводящие свойства этих материалов.

В предлагаемой лабораторной работе студенты изучают методику определения теплопроводности теплоизоляционного материала – асбеста. Такой материал широко применяется в эксплуатации, обслуживании и ремонте автомобилей для теплоизоляции. Сначала студенты изучают теоретические положения по теме, а затем приступают к выполнению лабораторной работы. Перед выполнением лабораторной работы готовят необходимые схемы и таблицы. Все изменения теплового режима лабораторной установки, а также включение и отключение ее производятся лаборантом или преподавателем.

После выполнения работы студенты представляют преподавателю результаты экспериментов. Полученные результаты обрабатываются согласно методическим указаниям. Все вычисления следует выполнять в системе СИ. Выполнение лабораторной работы завершается представлением отчета по установленной форме для проверки преподавателю.

Обязательным условием допуска студентов к выполнению лабораторной работы является знание ими правил техники безопасности.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с методикой определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала (слоя асбеста) и определение его зависимости от температуры экспериментальным путем.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Интенсивность переноса тепла в твердом теле (плотность теплового потока  $q$ ,) определяется согласно закону Фурье, температурным градиентом ( $grad\ t = \frac{dt}{dn}$ ) и коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ :

$$q = -\lambda \frac{dt}{dn}, \text{ Вт/м}^2; \quad \lambda = -\frac{q}{dt/dn}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что коэффициент теплопроводности численно равен количеству тепловой энергии, проходящей через, единицу площади изотермической поверхности в единицу времени при температурном градиенте равном единице. Размерность коэффициента теплопроводности  $\lambda$ ,  $\text{Вт/м} \cdot \text{К}$ .

Коэффициент теплопроводности является физическим параметром вещества, характеризующим его способность проводить теплоту. Знание его величины необходимо при тепловых расчетах различных механических устройств, нагревательных и плавильных печей, энергетических устройств и т.д. Для разных материалов он имеет различные значения и зависит от структуры вещества, температуры его, плотности, влажности и т.д.

Лучшими проводниками теплоты являются металлы, у которых  $\lambda$  изменяется от 3 до 418  $Вт/м\cdot К$ . Коэффициент теплопроводности чистых материалов, за исключением алюминия, с возрастанием температуры убывает. Наиболее высоким коэффициентом теплопроводности обладает чистое серебро ( $\lambda = 418 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ).

Коэффициенты теплопроводности теплоизоляционных материалов, имеющих пористую структуру, при повышении температуры возрастают по линейному закону и изменяются в пределах от 0,02 до 3,0  $Вт/м\cdot К$ . К теплоизоляционным относятся материалы с  $\lambda < 0,25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

Коэффициенты теплопроводности большинства капельных жидкостей с повышением температуры убывают и лежат в пределах от 0,08 до 1,5  $Вт/м\cdot К$ .

Коэффициенты теплопроводности газов при повышении температуры возрастают и изменяются от 0,05 до 0,6  $Вт/м\cdot К$ .

В большинстве случаев коэффициент теплопроводности для различных материалов определяется опытным путем. Одним из способов его определения является метод цилиндрического слоя при стационарном температурном поле. Он позволяет определить теплоизоляционные свойства материала в условиях, близких к реальным.

При установившемся тепловом состоянии системы «тело – окружающая среда» все тепло, выделяющееся в нагревателе, проходит сквозь цилиндрический слой и отдается окружающей атмосфере.

Количество тепла, проходящего сквозь цилиндрический слой в единицу времени, определяется по формуле:

$$Q = - \frac{t_1 - t_2}{\frac{l}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт} \quad (2)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно внутренний и наружный диаметры теплоизоляции, м;

$t_1$  и  $t_2$  – температуры материала соответственно с обогреваемой (внутренней) и охлаждаемой (наружной) сторон, °С;

$l$  – длина трубы, м.

Таким образом, известные значения  $l$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $Q$  полностью определяют величину коэффициента теплопроводности материала  $\lambda$ .

## ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рисунок 1) состоит из трубы 1 длиной 1 м. Изоляционный цилиндрический слой 2 материала, (асбеста) имеет внутренний диаметр  $d_1 = 25$  мм и наружный  $d_2 = 50$  мм. Внутри трубы на всей ее длине расположен электронагреватель 3. Так как изучается теплоотдача с боковой поверхности, то для исключения влияния торцов и уточнения расчетов исследуется изоляционный слой не на всей длине трубы, а только на ее среднем участке длиной  $l = 0,6$  м. При этом расчет мощности, выделяющейся на расчетном участке трубы, производится по амперметру 4 и вольтметру 5. Эта мощность регулируется автотрансформатором 6.

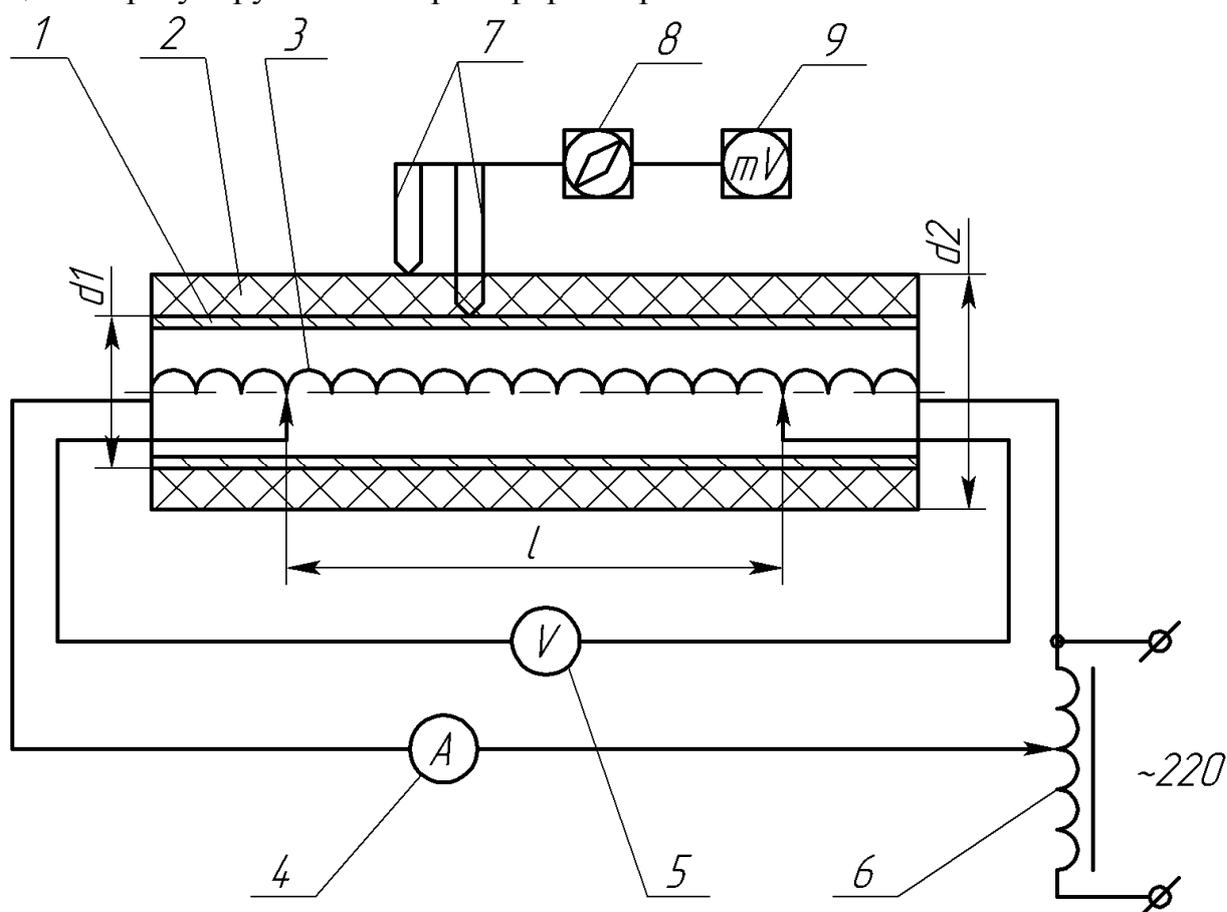


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

На внутренней и наружной поверхностях изоляционного слоя установлено 10 хромель-копелевых термопар 7 (на рисунке 1 условно показаны лишь две термопары, одна четная и одна нечетная), подключенных через переключатель 8 к милливольтметру 9, с помощью которого измеряется термо ЭДС.

Величина термо ЭДС по градуировочной таблице для хромель-копелевой термопары (приложение А), градуированной при температуре её холодного спая  $0^\circ\text{C}$ , переводится в  $^\circ\text{C}$ . Поскольку холодный спай термопар в данной установке общий и имеет температуру, равную температуре окружающего воздуха, поэтому следует ввести поправку на реальную температуру холодного спая.

## ОБЩАЯ МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для обеспечения стационарного теплового режима лабораторная установка должна быть включена в электрическую сеть за 1-2 часа до начала опыта. Признаком наступления стационарного режима является неизменность температуры любой точки изоляционного слоя. На практике режим можно считать стационарным, если температура по любой термопаре изменяется не более, чем на 2 °С в течение 5 минут.

Порядок выполнения лабораторной работы следующий:

- по амперметру 4 и вольтметру 5 определяют силу тока и напряжение на рабочем участке нагревателя;

- измеряют температуру на внутренней поверхности изоляционного слоя  $t_1$  (точки 1, 3, 5, 7, 9 переключателя 8) и на наружной поверхности  $t_2$  (точки 2, 4, 6, 8, 10 переключателя 8);

- преподаватель или лаборант устанавливает следующий тепловой режим работы установки; стационарный режим после этого достигается не ранее, чем через 25-30 минут. В течение этого времени следует произвести расчет средней температуры внутренней поверхности изоляции  $\overline{t_1}$ , и наружной  $\overline{t_2}$  первого режима и выполнить обработку результатов, полученных в первом опыте.

- после достижения установкой стационарного режима производятся замеры температур, силы тока и напряжения так же, как и для первого режима;

- затем устанавливается 3 режим работы установки. После достижения установкой стационарного режима выполняются все необходимые замеры так же, как и для режимов 1 и 2. Результаты всех измерений заносят в таблицу 1.

Время, необходимое для достижения установкой стационарного теплового режима используется студентами для обработки результатов, полученных в предыдущем опыте.

Результаты измерений студент должен представить преподавателю для проверки. В случае ошибок при измерениях и в тех случаях, когда измерения проводились при нестационарном режиме работы установки, эксперимент следует повторить.

Таблица 1 – Результаты измерений

№ режима	Сила тока	Напряжение	Температура теплоизоляции (по термопарам)														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Средние значения				
	$I$	$U$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$\bar{t}_1$	$\bar{t}_2$	$\bar{t}$
	$A$	$B$	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1																	
2																	
3																	

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

Для обработки можно использовать лишь данные, полученные при установившемся тепловом режиме работы установки.

Количество тепла, выделившегося на расчетном участке нагревателя в единицу времени:

$$Q = I \cdot U, \quad \text{Вт} \quad (3)$$

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала вычисляется из уравнения (2):

$$\lambda = - \frac{Q \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l \cdot (t_1 - t_2)}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \quad (4)$$

где  $t_1 = \bar{t}_1$ ;  $t_2 = \bar{t}_2$

Следует иметь в виду, что рассчитанные по (4) величины коэффициента теплопроводности для трех режимов работы установки соответствуют средней температуре слоя теплоизоляции  $\bar{t}$  в каждом режиме, причем:

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad \text{°C} \quad (5)$$

Затем строится график зависимости  $\lambda = f(\bar{t})$  по трем точкам, соответствующим трем режимам работы (пример такого графика приведен на рисунке 2).

Опыты показывают, что для многих материалов с достаточной для инженерных расчетов точностью эта зависимость может быть принята линейной вида  $y = a + bx$ .

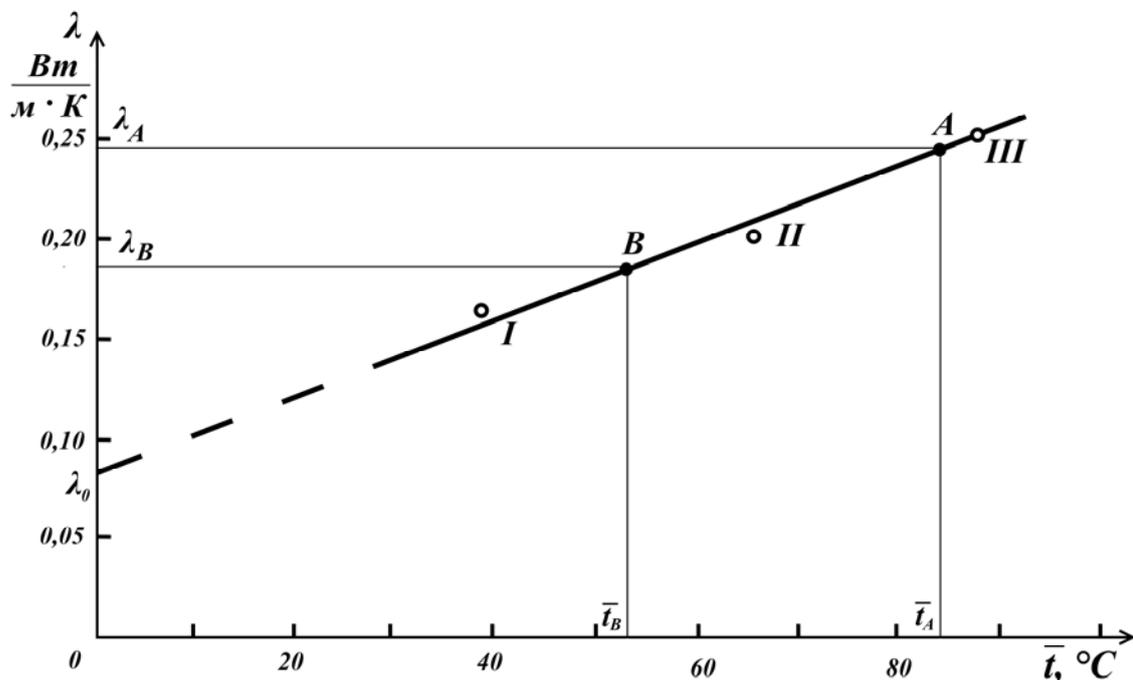


Рисунок 2 – Пример построения зависимости  $\lambda = f(\bar{t})$

Поэтому на графике  $\lambda = f(\bar{t})$  по экспериментальным точкам проводят прямую линию и определяют аналитическую зависимость  $\lambda$  от средней температуры  $\bar{t}$ :

$$\lambda = \lambda_0 + b \cdot \bar{t}, \quad (6)$$

где  $\lambda_0$  – значение коэффициента теплопроводности при температуре  $0^\circ\text{C}$ ,  
Вт/м · К;

$b$  – коэффициент, определяемый графоаналитически, Вт/м · К<sup>2</sup>.

Определение значения  $b$ , характеризующего наклон прямой графика  $\lambda = f(\bar{t})$ , производится по координатам двух произвольных точек  $A$  и  $B$ , взятых на прямой линии (см. рисунок 2).

$$b = \frac{\lambda_A - \lambda_B}{\bar{t}_A - \bar{t}_B}. \quad (7)$$

Полученные значения  $\lambda_0$  и  $b$  подставляют в (6) и записывают аналитическое выражение зависимости  $\lambda = f(\bar{t})$  в окончательном виде.

Для проверки правильности расчетов следует для любого значения  $\bar{t}$  сравнить два значения коэффициента теплопроводности, рассчитанные по полученному выражению  $\lambda = f(\bar{t})$  и определенные по графику.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальную схему установки с кратким ее описанием;
- 3) таблицу записи показаний приборов;
- 4) обработку результатов опытов по трем режимам;
- 5) график зависимости  $\lambda = f(\bar{t})$ ;
- 6) определение коэффициентов зависимости  $\lambda = \lambda_0 + b \cdot \bar{t}$ ;
- 7) аналитическое выражение  $\lambda = f(\bar{t})$ ;
- 8) проверку правильности расчетов (определение ошибки);
- 9) выводы по работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что такое теплопроводность?
- 2 Как определяется теплопроводность?
- 3 От чего зависит теплопроводность?
- 4 Определение истинной теплоёмкости.
- 5 Какие бывают удельные теплоёмкости?
- 6 Как измерить теплоёмкость?
- 7 Какие вещества имеют большую теплопроводность?
- 8 Какие вещества имеют меньшую теплопроводность?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Луканин, В. Н. Теплотехника [Текст] / В. Н. Луканин [и др.]. – М. : Высшая школа, 2004.
- 2 Техническая термодинамика / под ред. В. И. Крутова. – М. : Высшая школа, 1981.
- 3 Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В. В. Нащокин. – М. : Высшая школа, 1980.

Приложение А

Градуировочная таблица для хромель-копелевой термопары

T°С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Термоэдс, мВ.									
10	0.646	0.711	0.776	0.841	0.907	0.973	1.039	1.105	1.171	1.237
20	1.303	1.370	1.437	1.504	1.571	1.638	1.705	1.772	1.840	1.908
30	1.976	2.044	2.112	2.180	2.248	2.316	2.384	2.452	2.520	2.589
40	2.658	2.727	2.796	2.865	2.934	3.003	3.072	3.141	3.210	3.280
50	3.350	3.420	3.490	3.560	3.630	3.700	3.770	3.840	3.910	3.980
50	4.050	4.121	4.192	4.263	4.334	4.405	4.476	4.547	4.618	4.689
70	4.760	4.831	4.902	4.973	5.044	5.115	5.186	5.257	5.327	5.398
80	5.469	5.540	5.611	5.682	5.753	5.824	5.895	5.956	6.037	6.108
90	6.176	6.250	6.322	6.394	6.456	6.538	6.610	6.682	6.754	6.826
100	6.898	6.970	7.043	7.116	7.189	7.262	7.335	7.408	7.481	7.554
110	7.627	7.700	7.774	7.848	7.922	7.996	8.070	8.144	8.218	8.292
120	8.366	8.440	8.515	8.590	8.655	8.740	8.815	8.890	8.965	9.040
130	9.115	9.190	9.265	9.340	9.415	9.490	9.565	9.640	9.715	9.790
140	9.865	9.940	10.02	10.09	10.17	10.24	10.32	10.40	10.47	10.55
150	10.62	10.70	10.78	10.85	10.93	11.01	11.09	11.16	11.24	11.32
150	11.39	11.47	11.55	11.53	11.70	11.78	11.86	11.94	12.02	12.09
170	12.17	12.25	12.33	12.41	12.49	12.57	12.55	12.72	12.80	12.88
180	12.96	13.04	13.12	13.20	13.28	13.36	13.44	13.52	13.60	13.68
190	13.76	13.84	13.92	14.00	14.08	14.17	14.25	14.33	14.41	14.49
200	14.57	14.65	14.73	14.81	14.89	14.98	15.05	15.14	15.22	15.30
210	15.38	15.46	15.54	15.63	15.71	15.79	15.87	15.95	16.04	16.12
220	16.20	16.28	16.37	16.45	16.53	16.62	16.70	16.78	16.84	16.95
230	17.03	17.11	17.20	17.28	17.36	17.45	17.53	17.61	17.69	17.78
240	17.86	17.94	18.03	18.11	18.19	18.28	18.36	18.44	18.52	18.61
250	18.69	18.77	18.86	18.94	19.02	19.11	19.19	19.27	19.35	19.44

Савельев Виктор Андреевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
МЕТОДОМ ЦИЛЕНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Теплотехника»  
для студентов направления 190600.62

Редактор Е.А. Могутова

---

Подписано в печать 11.02.14	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать цифровая	Усл.печ. л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ 50	Тираж 50	Не для продажи

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.  
Курганский государственный университет.