

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
ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ МОНОТОННОГО НАГРЕВА**

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

Курган 2013

Кафедра: «Энергетика и технология 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

На транспорте широкое распространение получили тепловые машины – двигатели внутреннего сгорания ДВС, которые выделяют большое количество тепловой энергии. Эта теплота преобразуется в полезную работу – транспортировку различных грузов. В конструкциях транспортных средств применяются различные материалы для изоляции тепла в одних случаях и теплопроводности в других. Для этого необходимо знать теплопроводящие свойства этих материалов. Теплопроводность материалов студенты изучают в процессе проведения лабораторной работы с использованием методики монотонного нагрева в динамическом калориметре ИТ- λ -400.

После контроля знаний студенты приступают к выполнению лабораторной работы. В ходе эксперимента студенты представляют преподавателю результаты измерений. Если полученные результаты правильны, то студенты приступают к обработке экспериментальных данных. Все вычисления следует выполнять в системе СИ и указывать единицы измерения у каждой расчетной величины. Выполнение лабораторной работы завершается представлением отчета по установленной форме.

Обязательным условием допуска студентов к выполнению лабораторной работы является знание ими правил техники безопасности при работе в лаборатории теплотехники.

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с определением коэффициента теплопроводности твердых материалов в режиме монотонного нагрева методом динамического λ – калориметра и определение температурной зависимости коэффициента теплопроводности экспериментальным путем.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

Для выявления физической сущности метода измерения коэффициента теплопроводности в режиме монотонного разогрева рассмотрим рисунок 1.

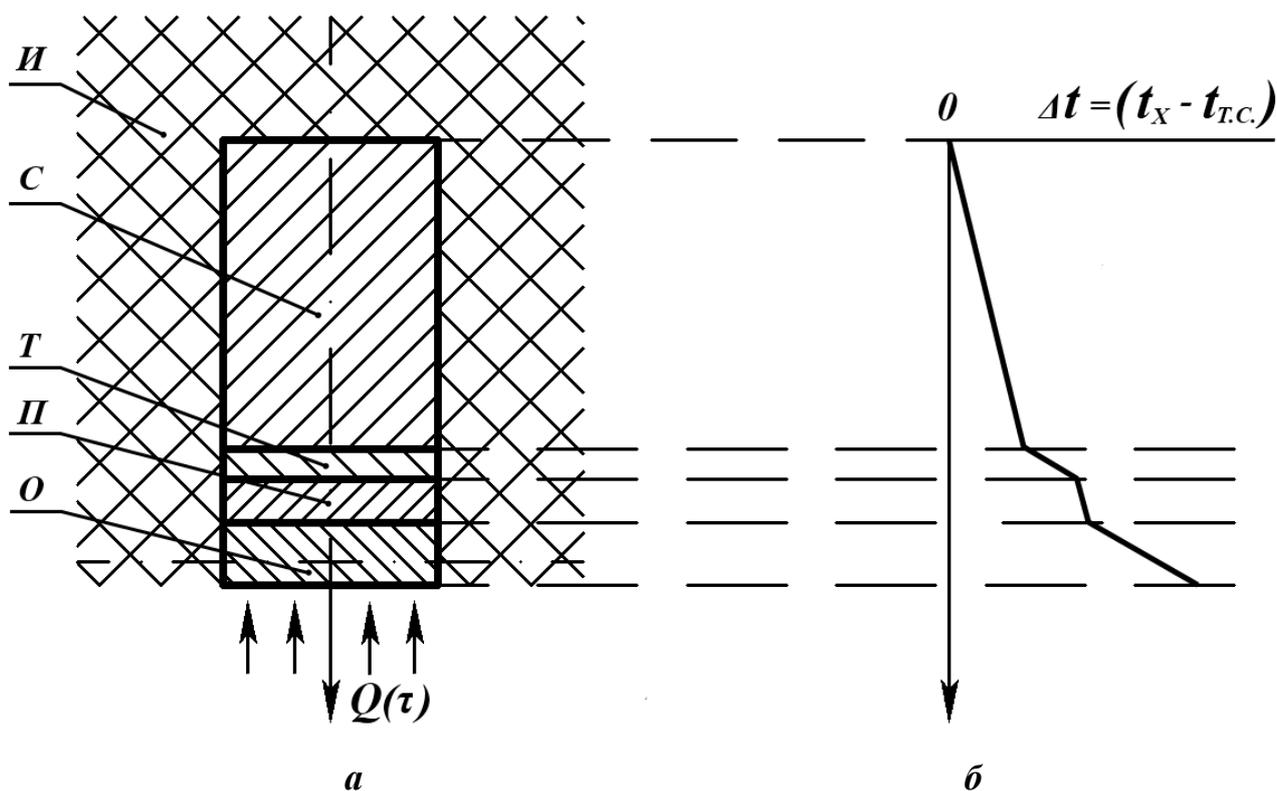


Рисунок 1 – Тепловая схема метода

На нем представлена тепловая схема одного из вариантов метода. Система (рисунок 1 *а*) состоит из металлических стержня *С* и пластины *П*, термомера *Т* и образца *О*. На протяжении опыта стержень и образец монотонно разогреваются тепловым потоком $Q(\tau)$, который проникает в систему через нижний торец образца. Между всеми элементами системы (*О*, *П*, *Т*, *С*) предусматривается хороший тепловой контакт. Благодаря наличию высокоэффективной (идеальной) изоляции *И* практически весь тепловой поток $Q(\tau)$ расходуется на повышение энтальпии деталей измерительной системы, что проявляется в повышении их температуры.

Вскоре после начала нагрева, если он протекает достаточно медленно, все детали системы разогреваются с близкими между собой скоростями. Если по температурной оси (рисунок 1 *б*) откладывать не абсолютные значения, а температурный напор (перепад температур относительно температуры верхнего торца стержня), то распределение перепада температур по высоте измерительной системы *X* будет соответствовать изображенному на рисунке 1 *б*. Следует заметить, что в то время, как абсолютные значения температуры всех точек системы в процессе её разогрева возрастают, превышение

температуры любой точки относительно торца стержня при $Q(\tau) = const$ будет неизменным, если не меняются физические свойства элементов системы: теплопроводность λ и теплоемкость C .

Опыт ставится так, чтобы тепловой поток, непрерывно проходящий через испытуемый образец, значительно превышал количество тепловой энергии, задерживающейся в самом образце и идущей на нагрев его. Это достигается за счет увеличения теплоемкости стержня: $C_C/C_O = 5 \div 10$. Мощность теплового потока Φ , прошедшего через образец, может быть определена с использованием закона Фурье:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²,

$\frac{\partial t}{\partial n}$ – градиент температур, К/м;

λ – коэффициент теплопроводности.

Для условий опытной установки, описанных выше, можно получить

$$\Phi_o = \lambda_o A_o \frac{\Delta t_o}{\delta_o}, \quad (2)$$

где λ_o – коэффициент теплопроводности материала образца, подлежащий определению (Вт/м·К);

A_o – площадь поперечного сечения образца и всех других элементов системы (м²);

Δt_o – перепад температуры на образце (К);

δ_o – толщина образца (м).

Формула выведена из закона Фурье для одномерного распространения теплового потока, и из условия малой теплоемкости образца по сравнению с теплоемкостью стержня. Тепловой поток Φ , проходящий через сечение 0–0, идет на нагрев половины пластины, тепломера, стержня. Так как

$$Q = C \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где Q – количество теплоты,

C – теплоемкость полная,

Δt – изменение температуры,

$$\text{то} \quad \Phi = C \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где $\frac{\partial t}{\partial \tau}$ – скорость изменения температуры тела.

В установке обеспечена равная скорость нагрева стержня, образца и тепломера после установления монотонного режима (1-2 с после включения установки), поэтому

$$C = C_C + C_T + C_{II} + 0,5C_O, \quad (5)$$

$$\Phi_C = (C = C_C + C_T + C_{II} + 0,5C_O) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (6)$$

где C_C, C_T, C_{II}, C_O - полные теплоемкости стержня, тепломера, пластины и образца соответственно (Дж/К);

$\frac{\partial t}{\partial \tau}$ – скорость нагрева, которая для всех элементов системы одинакова (К/с).

Принимая $C_T = 0$, последнее выражение преобразуется к виду

$$\Phi_C = C_C \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \left(1 + \frac{C_{II} + 0,5C_O}{C_C} \right). \quad (7)$$

Легко видеть, что величина $C_C \frac{\partial t}{\partial \tau}$ есть мощность теплового потока, проходящего через тепломер за единицу времени:

$$\Phi_T = C_C \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (8)$$

В связи с тем, что тепломер – стационарный элемент измерительной системы, величину Φ_T удобно определять измеряя перепад температур на нем Δt_T :

$$\Phi_T = K_T \cdot \Delta t_0, \quad (9)$$

где $K_T = K_T(t) = \lambda_T \cdot A/\delta_T$ – коэффициент пропорциональности (Вт/К), характеризующий тепловую проводимость слоя, практически постоянную в пределах перепадов Δt_T (в силу его малости), но зависящую от уровня температуры опыта.

Формула (9) получена аналогично формуле (2) только для тепломера.

Значения проводимости тепломера K_T при различной температуре определяются при наладке прибора и представляются потребителю в виде справочных данных.

Из (2), (6), (7) и (8), (9) легко получить

$$\lambda_0 = \frac{\delta_0}{A} \cdot \frac{K_T \cdot \Delta t_T}{\Delta t_0} \cdot \left(1 + \frac{C_{II} + 0,5C_o}{C_c} \right)$$

или

$$\lambda_0 = \frac{\delta_0}{A} \cdot \frac{K_T \cdot n_T}{n_0} \cdot (1 + \epsilon) \quad (10)$$

В формуле (10) учтено то, что $\Delta t_0 = a_t \cdot n_0$ и $\Delta t_t = a_t \cdot n_t$ (см. пункт 5.4 методических указаний).

Величина поправки $\epsilon = \frac{C_{II} + 0,5C_o}{C_c}$ обычно невелика в сравнении с единицей ($\epsilon \approx 0,05 - 0,1$). Вид выражения для подсчета поправки ϵ определяется схемой измерительной ячейки (см. рисунок 1 а) для прибора, используемого в работе, поправка определяется по формуле

$$\epsilon = \frac{C_o}{2(C_o + C_c)} \quad (11)$$

Таким образом, для того, чтобы определить значение коэффициента теплопроводности материала образца λ_0 при некоторой температуре t_i , необходимо знать значение всех величин, входящих в правую часть выражения (10), из которых только Δt_T и Δt_0 должны быть определены экспериментальным путем при выполнении работы.

Используемая в работе установка позволяет определять коэффициент теплопроводности при значениях температуры $t_i = -100; -75; -50; -25; 0; +25 \dots +375, +400$ °С. При выполнении лабораторной работы температурный интервал зависимости $\lambda = f(t)$ указывается преподавателем.

3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка состоит из двух блоков – блока питания и регулирования и измерительного комплекса – микровольтнаноамперметра Ф-136. Общий вид экспериментальной установки показан на рисунке 2.

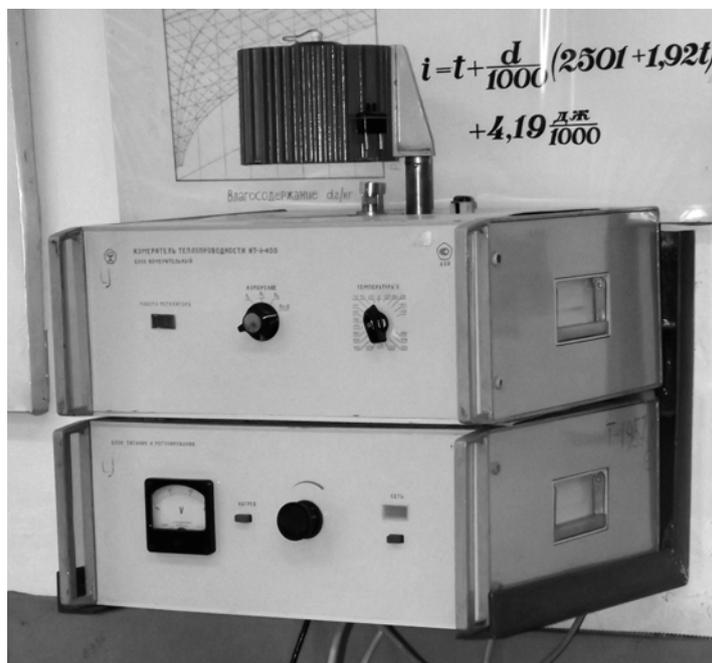
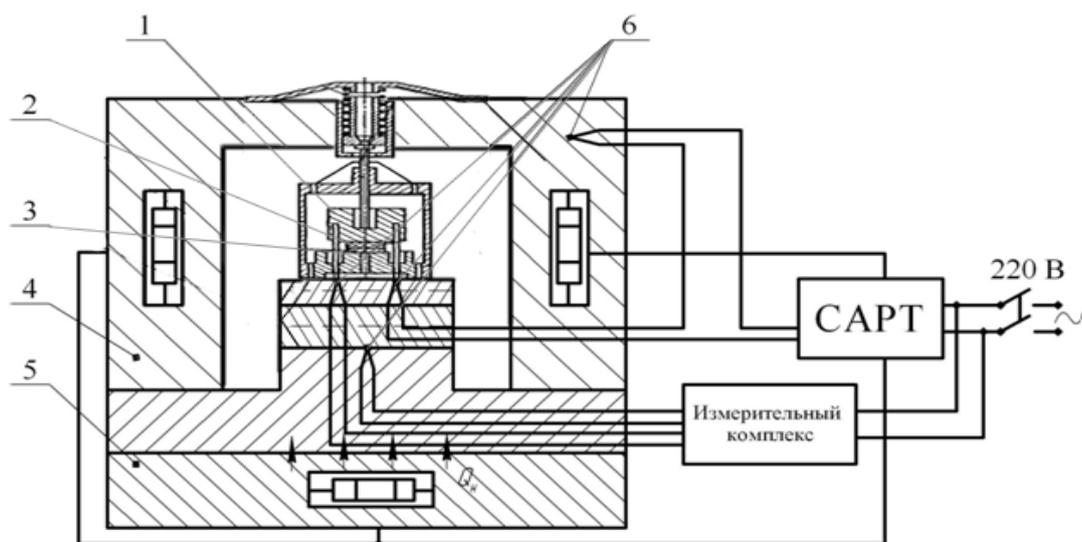


Рисунок 2 – Измеритель теплоёмкости ИТ-λ-400

На блоке регулирования установлена измерительная ячейка. В ней на медном основании – контактной пластине 3, которая является тепломером размещены: испытуемый образец 2, хромель-алюмелевые термопары 6. Основание соединено с нагревательным блоком 5 и прикреплено к нижней половине корпуса измерительной ячейки. К верхней части корпуса крепится адиабатная оболочка 4. Испытуемый образец 2, установленный на тепломере, сверху поджимается через стержень 1 прижимным устройством. Рабочим слоем термопары является пластина 1 из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Основание и тепломер спаяны друг с другом. Схема измерителя ИТ-λ-400 представлена на рисунке 3.



1 – стержень; 2 – испытуемый образец; 3 – термомер; 4 – адиабатическая оболочка; 5 – нагреватель; 6 – термопара; САРТ-система автоматического регулирования температуры; измерительный комплекс-микровольтнаноамперметр Ф-136-3

Рисунок 3 – Схема измерителя ИТ-λ-400

4 ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Перед выполнением экспериментальной части работы необходимо определить геометрические размеры и массу образца m_0 .

Общая схема выполнения экспериментов состоит в следующем (без рассмотрения порядка подготовки приборов к работе): при медленном нагреве измерительной ячейки оператор следит по прибору Ф – 136 за ростом температуры стержня и в момент достижения нужного значения температуры t_i определяет (по возможности быстро, так как температура непрерывно увеличивается) значения перепадов температур на образце и термомере, после чего ожидает нового значения температуры t_{i+1} и т.д.

4.1 Подготовка приборов к работе

Устанавливают диапазон измерений напряжения 100-0-100 V, для этого нажимают кнопку «V» и устанавливают ручку переключателя конечных

значений диапазонов измерений так, чтобы риска на ручке находилась против отметки «100». После нажатия кнопки переключателя **APP** нажимают кнопку переключателя **СЕТЬ**. Для установления рабочего режима выдерживают прибор Ф–136 включенным в течение 30 мин. После этого устанавливают световой указатель прибора Ф–136 в нулевое положение, для чего нажимают на кнопку « μV », на кнопку **КОМПЕНСАЦИЯ** и, вращая часовой отверткой движок переменного резистора, устанавливают, если необходимо, световой указатель на нулевую отметку шкалы.

Перед включением измерителя теплопроводности устанавливают переключатель **ИЗМЕРЕНИЕ** в положение **УСТ. 0**, переключатель **ТЕМПЕРАТУРА** в положение 25 °С.

4.2 Порядок проведения эксперимента

- измеряют высоту δ_0 и диаметр d_0 образца с погрешностью $\pm 0,001$ мм;
- определяют массу m_0 , взвешивая образец с погрешностью $\pm 0,001$ г;
- устанавливают образец на контактную пластину тепломера, стержень на иглы-термопары;
- опускают верхнюю половину корпуса измерительной ячейки и включают блок питания и регулирования кнопкой **СЕТЬ**;
- устанавливают по вольтметру начальное напряжение 40 В при работе от 25 °С;
- устанавливают переключатель **ИЗМЕРЕНИЕ** в положение t_c . (При этом прибор Ф–136 «сравнивает» два сигнала: заданный переключателем **ТЕМПЕРАТУРА** и «сообщаемый» термопарой стержня. В случае их совпадения, т.е. равенства температур стержня и установленной переключателем, световой указатель показывает 0);
- включают кнопкой **НАГРЕВ** основной нагреватель (начинается нагрев измерительной ячейки, скорость которого определяется заданным напряжением 40 В);
- при достижении температурой стержня значения, установленного переключателем **ТЕМПЕРАТУРА** (прохождение светового указателя через ноль шкалы) измеряют перепад температур (точнее, значения n_0 и n_t пропорциональные перепаду температур: $\Delta t = a_T n$, где a_T – чувствительность термопары, К/мВ); для измерения n_0 и n_t переводят переключатель

ИЗМЕРЕНИЕ в положение n_0 и n_t соответственно и отсчитывают значение n_0 и n_t на шкале прибора Ф–136;

- устанавливают переключатель **ИЗМЕРЕНИЕ** в положение t_c , а переключатель **ТЕМПЕРАТУРА** в положение, соответствующее следующему (более высокому) значению температуры и после достижения нужной температуры вновь измеряют n_0 и n_t ; результаты измерений заносят в таблицу 1;

- выключают кнопкой **НАГРЕВ** основной нагреватель при достижении верхнего уровня температуры испытаний;

- устанавливают переключатель **ИЗМЕРЕНИЕ** в положение **УСТ.0**;

- выключают прибор Ф – 136, предварительно заарретировав его;

- после охлаждения измерительной ячейки до комнатной температуры выключают блок питания и регулирования.

Таблица 1 – Результаты измерений

Температура, за данная	Перепад температуры на образце	Перепад температуры на рабочем слое тепломера	Поправка на теплоемкость образца	Тепловое сопротивление образца	Коэффициент теплопроводности	Средняя температура-ра образца
$t_c, ^\circ\text{C}$.	$n_0, \text{мкВ}$.	$n_t, \text{мкВ}$.	$B, \text{б/р}$.	$R_0, \text{К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$	$\lambda_0 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$.	$\bar{t}, ^\circ\text{C}$.
25						
50						
75						
100						
125						

5 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

По формуле

$$\lambda_0 = \frac{\delta_0}{A} \cdot \frac{K_T \cdot n_T}{n_0} \cdot (1 + \epsilon)$$

для каждой температуры эксперимента t_i определяют значение коэффициента теплопроводности материала образца λ_0 по следующей схеме:

- 1) определяют площадь образца A , м².
- 2) рассчитывают поправку ν по формуле (11)

$$\nu = \frac{C_o}{2(C_o + C_c)},$$

где C_c – теплоемкость стержня, Дж/К (см. приложение А);

C_o – теплоемкость образца, Дж/К;

$C_o = C_o(t) m_o$ (ориентировочное значение удельной теплоемкости образца $C_o(t)$ (Дж/кг К) сообщает преподаватель);

3) определяют по приложению А значение K_T для рассматриваемой температуры;

4) определяют значения n_o и n_t по таблице результатов измерений. Нахождение Δt_T и Δt_o оказывается ненужным, т.к. в формулу (10) входит отношение этих величин

$$\frac{\Delta t_T}{\Delta t_o} = \frac{a_t \cdot n_T}{a_t \cdot n_o} = \frac{n_T}{n_o}$$

5) рассчитывают коэффициент теплопроводности материала образца λ_o по выражению (10).

6) так как по толщине образца наблюдается перепад температуры (см. рисунок 1б) $\Delta t_o = a_T n_o$ (т.е. образец имеет различную температуру по высоте), то найденное значение λ_o следует отнести к средней температуре образца \bar{t}_o :

$$\bar{t}_o = t_c + 0,5 a_t \cdot n_o$$

После вычисления λ_o для ряда значений температуры строят график зависимости $\lambda_o = f(\bar{t}_o)$.

Обратите внимание на размерность a_t и n_o

6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен включать:

- цель работы;
- принципиальную схему установки с кратким её описанием;
- основные расчетные формулы;

- таблицу показаний приборов;
- подробный расчет всех величин для первого опыта;
- обработку результатов опытов при всех температурах, указанных преподавателем (результаты расчетов заносятся в сводную таблицу);
- график зависимости $\lambda_o = f(\bar{t}_o)$;
- выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что такое теплопроводность?
- 2 За счет чего осуществляется теплопроводность в твердых телах?
- 3 В чем сущность метода измерения коэффициента теплопроводности λ в режиме монотонного разогрева? Вывести выражение для расчета λ с использованием этого метода.
- 4 Что такое коэффициент теплопроводности?
- 5 Основные положения теплопроводности: температурное поле, градиент температуры, изотермическая поверхность.
- 6 В каком случае температурное поле является стационарным?
- 7 Закон Фурье.
- 8 Условия однозначности.
- 9 От чего зависит коэффициент теплопроводности?

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.
- 4 Платунов, Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме [Текст] / Е. С. Платунов – М. : Энергия, 1973.

Таблица А1 – Постоянные измерителя, полученные при градуировке

t_c , °C	C_c , Дж/К	K_T , Вт/к	a_t , гр/мВ
0	14,2812	0,1546	25,0
25	14,6231	0,1644	24,8
50	14,8889	0,1662	24,5
75	15,0409	0,1689	24,6
100	15,1928	0,1756	24,7
125	15,3067	0,1757	24,8
150	15,3827	0,1731	25,0
175	15,3227	0,1766	25,0
200	15,4967	0,1785	25,0
225	15,5726	0,1821	24,9
250	15,6286	0,1850	24,8
275	15,7625	0,1836	24,5
300	15,8385	0,1830	24,2
325	15,9524	0,1859	24,0
350	16,0284	0,1873	23,8
375	16,0664	0,1882	23,8
400	16,1424	0,1911	23,75

Савельев Виктор Андреевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ МОНОТОННОГО НАГРЕВА**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

по дисциплине «Теплотехника»

для студентов направления 190600.62

Редактор Е.А. Могутова

Подписано в печать 06.03.2014	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать цифровая	Усл. печ.л. 1,0	Уч.- изд. л. 1,0
Заказ 77	Тираж 50	Не для продажи

РИЦ Курганского государственного университета.

640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.

Курганский государственный университет.