

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

Кафедра энергетика и технологии металлов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ,  
СЫПУЧИХ И ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы по курсам  
теплотехники, термодинамики и теплопередачи,  
гидрогазодинамики и тепломассообмену, теплофизики  
для студентов специальностей 190109.65, 190110.65,  
направлений 190600.62, 280700.62, 140400.62

Курган 2013

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплины: «Теплотехника», «Термодинамика и теплопередача», «Гидрогазодинамика и теплообмен», «Теплофизика» (специальности 190109.65, 190110.65, направления 190600.62, 280700.62, 140400.62)

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

Утверждены на заседании кафедры «29» апреля 2013 г.

Рекомендованы методическим советом университета «29» апреля 2013 г.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ, СЫПУЧИХ И ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы:

Изучение методики определения удельной теплоёмкости различных материалов динамическим калориметром ИТ-с-400.

### ТЕПЛОЁМКОСТЬ

Теплоёмкостью называется количество теплоты, необходимое для нагрева тела на один градус  $C=Q/\Delta T$ . Удельной теплоёмкостью  $c$  называется количество теплоты  $q$ , которое требуется для изменения температуры единицы количества вещества на один градус  $c=q/\Delta T$ ;  $c=dq/dT$ .

В зависимости от способа измерения количества вещества, характера термодинамического процесса и величины интервала температур различают несколько видов теплоёмкости: массовую удельную теплоёмкость  $c$  [Дж/кг·К], объёмную удельную теплоёмкость  $c'$  [Дж/м<sup>3</sup>·К], молярную удельную теплоёмкость  $c_\mu$  [Дж/кмоль·К]. Связь между ними выражается зависимостью:  $c=c'/\rho=c_\mu/\mu$ , где  $\rho$  – плотность вещества [кг/м<sup>3</sup>],  $\mu$  – относительная молекулярная масса [кг/кмоль], Количество теплоты  $Q$  определяется по формуле:

$$Q=cm(T_2 - T_1) = c'V_n(T_2 - T_1) = V_n c_\mu \cdot n(T_2 - T_1), \quad (1)$$

где  $m$  – масса вещества;

$V_n$  – объём вещества, приведённый к нормальным условиям;

$n$  – число молей вещества.

Подвод теплоты к рабочему телу в тепловых установках может осуществляться в различных условиях протекания термодинамического процесса, например, при постоянном объёме ( $v=\text{const}$ )-изохорная теплоёмкость  $c_v$  и изобарная теплоёмкость  $c_p$  при постоянном давлении ( $p=\text{const}$ ).

Теплоёмкость, определяемая отношением элементарного количества теплоты, сообщаемой термодинамической системе к бесконечно малой разности температур, называется истинной теплоёмкостью  $C=dq/dT$ .

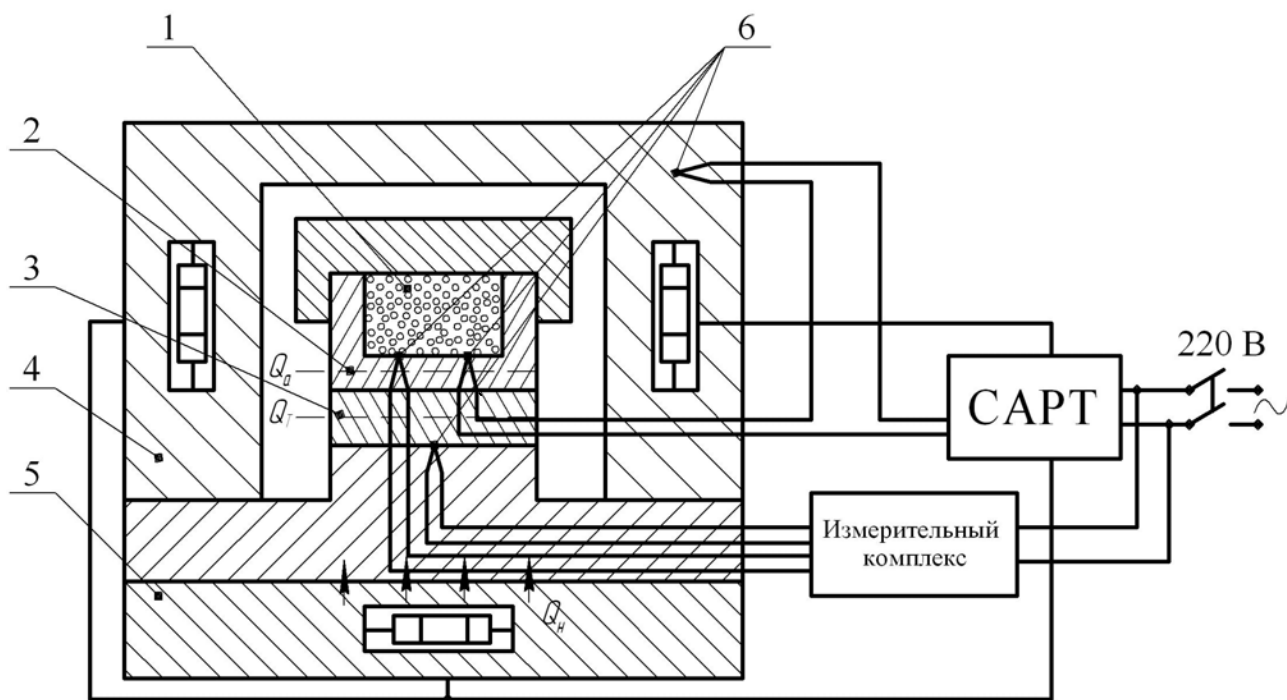
Средней удельной теплоёмкостью  $C$  данного процесса в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  называют отношение количества теплоты  $q_{1-2}$ , переданного в процессе, к конечной разности температур  $t_2-t_1$ :

$$C= q_{1-2}/ t_2-t_1. \quad (2)$$

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

В основу работы измерителя теплоёмкости ИТ-с-400 положен сравнительный метод динамического калориметра с тепломером и адиабатической оболочкой.

Схема устройства измерения представлена на рисунке 1.



1 – испытуемый образец; 2 – металлическая ампула; 3 – тепломер;  
 4 – адиабатическая оболочка; 5 – нагреватель; 6 – термопара; САРТ-система  
 автоматического регулирования температуры; измерительный комплекс-  
 микровольтнаноамперметр Ф-136-3  
 Рисунок 1 – Схема измерителя ИТ-с-400

Испытуемый образец 1 размещается внутри металлической ампулы 2 и монотонно разогревается вместе с ней за счёт непрерывно поступающего к ампуле через тепломер 3 теплового потока  $Q_T$ .

Тепловая связь ампулы 2 и образца 1 с внешней средой допускается только через тепломер 3, поэтому открытые участки поверхности ампулы отделены от среды адиабатической оболочкой 4.

Тепловой поток  $Q_T$ , проходящий через среднее сечение тепломера, идёт на разогрев испытуемого образца и ампулы и определяется по формуле:

$$Q_T = Q_o + Q_a, \quad (3)$$

где  $Q_o$  – тепловой поток, идущий на разогрев образца, [Вт];

$Q_a$  – тепловой поток, идущий на разогрев ампулы, [Вт].

Тепловой поток, идущий на разогрев образца, определяется по формуле:

$$Q_o = c \cdot m_o \cdot v_T,$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость образца,  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ ;

$m_o$  – масса образца, [кг];

$v_T$  – скорость разогрева, [К/с].

Тепловой поток, идущий на разогрев ампулы, определяется по формуле:

$$Q_a = c_a \cdot v_T,$$

где  $c_a$  – полная теплоёмкость ампулы, [Дж/К].

О величине теплового потока, проходящего через тепломер  $Q_T$ , удаётся судить по величине перепада температуры на нём  $\Delta T$  и тепловой проводимости тепломера  $k_T$ , определённой из независимых градуировочных экспериментов

$$Q_T = k_T \cdot \Delta T. \quad (4)$$

Параметр  $k_T = k_T$  (Т) является постоянной прибора и зависит только от температурного уровня. Формула теплоёмкости образца получит вид:

$$C = \frac{I}{m_o} \left( \frac{k_T \cdot \Delta T}{\nu_T} - c_a \right), \quad (5)$$

где  $C$  – удельная теплоёмкость образца,  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ .

При малых перепадах температуры на тепломере, учитывая, что

$$\tau_T = \frac{\Delta T}{\nu_T},$$

где  $\tau_T$  – время запаздывания температуры на тепломере, [с].

После подстановки значений получаем расчётную формулу

$$C = \frac{k_T}{m_o} (\tau_T - \tau_T^o), \quad (6)$$

где  $\tau_T^o$  – время запаздывания температуры на тепломере в экспериментах с пустой ампулой, [с]:

$$c_a = k_m \cdot \tau_T^o. \quad (7)$$

## УСТРОЙСТВО И РАБОТА ИЗМЕРИТЕЛЯ ТЕПЛОЁМКОСТИ ИТ-С-400

В состав измерительного комплекса входят: блок питания и регулирования, измерительный блок, микровольтнаноамперметр Ф-136-3.

Внешний вид измерителя ИТ-с-400 показан на рисунке 2.

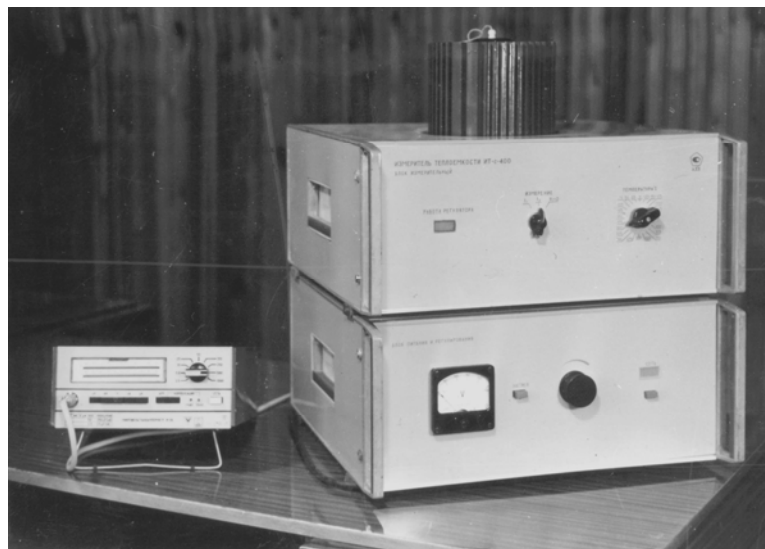


Рисунок 2 – Измеритель теплоёмкости ИТ-с-400

Важнейшей частью измерительного блока является измерительная ячейка. Верхняя часть измерительной ячейки – съёмная и служит для поддержания адиабатических условий. В нижней части ячейки на медном основании размещены хромель-алюмелевые термопары, пластины, представляющие тепломер на медном основании, ампула для образца. Рабочим слоем тепломера является кольцо из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Основание, кольцо и ампула спаяны друг с другом серебряным припоем. В ампулу устанавливается испытуемый образец, а сверху закрывается крышкой.

В измерительном блоке смонтирована электроизмерительная схема, включающая упрощённый потенциометр, термопары Тп1-Тп4. Микровольтнаноамперметр Ф-136 используется как нуль-прибор в потенциометре. Потенциометр рассчитан на определённые значения термо-ЭДС, соответствующие фиксированным уровням температур от -125 до 400°С через интервал 25°С. Потенциометр питается от стабилизированного источника питания ИПС3-0,2. Переключатель термопар имеет 3 положения:  $t_1$ ,  $t_2$  и установка нуля. В положениях  $t_1$ ,  $t_2$  измеряется температура основания и образца. В положении установка 0 проверяется механический нуль прибора Ф-136.

Блок питания и регулирования предназначен для питания и управления нагревательными элементами образца и тепломера. В этом блоке установлены: лабораторный автотрансформатор ЛАТР-ГМ, электрические реле, редуктор, усилитель У1-01, набор электрических сопротивлений. На панели блока установлены: вольтметр, переключатели, ручка установки начального напряжения на вольтметре. Редуктор приводится в движение электродвигателем и плавно перемещает движок автотрансформатора ЛАТР-ГМ. Возвращение движка в исходное положение осуществляется поворотом ручки против часовой стрелки. При этом необходимо оттянуть ручку на себя для расцепления механического редуктора.

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Для выполнения работы по определению теплоёмкости используется следующее оборудование: измеритель теплоёмкости ИТ-с-400, секундомер, набор образцов, эталонный образец, растворитель, смазка, аналитические весы.

## ПОДГОТОВКА АППАРАТУРЫ К РАБОТЕ.

1 Проверить электрическую стыковку блоков и прибора Ф-136 между собой и к сети 220В.

2 Переключатели «сеть» и «нагрев» должны быть в положении «выкл.».

3 Микровольтметр Ф-136 перед началом работы должен быть прогрет в течении 0,5 часа. Перед включением прибора на самонагрев переключатель рода работы установить в положение «app.» (прибор заарретирован), а переключатель чувствительности установлен на наиболее грубый предел (диапазон измерений напряжения 100-0-100V, нажав кнопку «V» и ручку

переключателя конечных значений диапазонов, установить против отметки «100»). После этого включить прибор кнопкой «сеть».

### ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦА

Измерения проводят на образцах диаметром  $\varnothing 15 \pm 0,1$  мм и высотой  $h = 10 \pm 0,5$  мм. Твёрдые образцы перед установкой в прибор промывают бензином или другим растворителем и смазывают тонким слоем смазки ПФМС-4. Можно применять и другие жидкие смазки, нейтральные к материалу образца и ампулы и химически стойкие до температур  $400^\circ\text{C}$ . Если образцы впитывают жидкую смазку, можно применять графитовую или алюминиевую пудру. Жидкие или порошкообразные образцы заливают (засыпают) в предварительно промытую ампулу.

Перед установкой образца в ампулу определяют массу образца  $m_0$  на аналитических весах с точностью  $\pm \text{мг} (\pm 0,001\text{г})$ . Результаты измерения заносятся в протокол испытаний.

### УСТАНОВКА ОБРАЗЦА В ИЗМЕРИТЕЛЬ ИТ-с-400

- 1 Поднимите колпак измерительной ячейки вверх до упора и поверните вправо до фиксации.
- 2 Снимите крышку ампулы, промойте и протрите ампулу и крышку.
- 3 Вставьте (засыпьте) в ампулу подготовленный образец и закройте его крышкой.
- 4 Верните колпак в исходное состояние и проверьте, чтобы он плотно встал на своё место.

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

- 1 Включите блок питания и регулирования, нажав кнопку «сеть».
- 2 Выведите по вольтметру блока питания и регулирования напряжение до 0.
- 3 Установите переключатель «измерение» в положение  $t_1$ .
- 4 Настройте микровольтнаноамперметр Ф-136. Свидетельством того, что блок имеет необходимую начальную температуру, является выравнивание показаний вольтметра при положениях переключателя «температура»  $t_1$  и  $t_2$ .
- 5 Установите по вольтметру нагревателя начальное напряжение  $40 \pm 2\text{В}$  (кнопка «нагрев» нажата).
- 6 Установите переключатель «температура» в положение  $25^\circ\text{C}$  (при этом прибор Ф-136 «сравнивает» два сигнала: заданный переключателем «температура» и «сообщаемый» термопарой образца. В случае их совпадения, т.е. равенства заданной температуры и температуры образца, световой указатель прибора покажет 0).
- 7 При прохождении светового указателя через 0 шкалы включают секундомер и переключатель «измерение» переводят в положение  $t_2$ .

- 8 При прохождении светового указателя через 0 шкалы прибора Ф-136 секундомер выключают.
- 9 Показания секундомера заносят в графу « $\tau_T$ » протокола испытаний.
- 10 Переключатель «температура» переводят в следующий диапазон 50°C, а переключатель «измерение» – в положение  $t_1$ .
- 11 Затем последовательно измеряют временной интервал  $\tau_T$  в заданных пределах температуры нагрева, указанной в протоколе испытаний (125°C).
- 12 При достижении верхнего уровня температуры испытаний выключите нагреватель кнопкой «нагрев».
- 13 Заарретируйте прибор Ф-136 и выключите его.
- 14 Установите переключатель «измерение» в положение 0.
- 15 Выключите блок питания и регулирования кнопкой «сеть».
- 16 Проведите расчёт удельной теплоёмкости.

Таблица 1 – ПРОТОКОЛ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытуемый образец _____				Масса $m_o=$	
№	$t_3, ^\circ\text{C}$	$\tau_{T,c}$	$\tau_{T^o},c$	$k_T$	$C,$
1	25		11,4	0,373	
2	50		12,2	0,408	
3	75		12,9	0,421	
4	100		12,9	0,388	
5	125		12,5	0,391	
6	150		13,5	0,422	

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчёт теплоёмкости выполняем по формуле

$$C = \frac{k_T}{m_o} (\tau_T - \tau_T^o), \quad (6)$$

где  $\tau_T^o$  – постоянная измерителя, указана в таблице 1;

$\tau_T$  – время запаздывания температуры на тепломере, [с];

$k_T$  – тепловая проводимость тепломера, [Вт/К];

$m_o$  – масса образца, [кг];

$C$  – удельная теплоёмкость образца,  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ .

Результаты расчёта заносят в протокол испытаний.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Результаты измерений обрабатывают следующим образом:

- 1 Определяют среднее арифметическое рассчитанных значений теплоёмкости в измеренном температурном диапазоне по формуле



$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, \quad (7)$$

где  $\bar{C}$  – среднее арифметическое из рассчитанных значений удельной теплоёмкости,  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ ;

$C_i$  – рассчитанные значения удельной теплоёмкости при данной температуре,  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ ;

$n$  – количество экспериментов.,

Если одно из значений теплоёмкости  $C_i$  резко отличается от остальных, то проверяют, не является ли оно промахом и следует ли его учитывать в расчётах.

2 Проводят оценку среднеквадратичного отклонения по формуле

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}}. \quad (8)$$

3 Определяют случайную составляющую погрешность по формуле

$$\Delta^o = \frac{\bar{\sigma} \cdot t_p}{\bar{C}} \cdot 100, \quad (9)$$

где  $\Delta^o$  – случайная составляющая погрешность в %;

$t_p$  – коэффициент Стьюдента (для  $n=5$   $t_p=2,78$  при  $P=0,95$ ).

4 Определяем систематическую составляющую погрешности по формуле

$$\Delta_c = \frac{\bar{C} - C_{\text{табл.}}}{C_{\text{табл.}}} \cdot 100, \quad (10)$$

где  $\Delta_c$  – систематическая составляющая погрешности;

$C_{\text{табл.}}$  – значение теплоёмкости образцовой меры для данного материала.

5 Определяем предел допускаемой основной погрешности

$$\Delta = \Delta_c + \Delta^o.$$

Предел допускаемой основной погрешности при определении теплоёмкости  $\pm 10\%$ .

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- 1) название лабораторной работы;
- 2) цели исследований;
- 3) схему лабораторного стенда с указанием основных элементов;
- 4) протокол исследований;
- 5) расчетные формулы с числовым примером по одному опыту;
- 6) выводы, с указанием выполнения поставленных целей и краткой характеристикой результатов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Луканин, В. Н. Теплотехника [Текст] / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер [и др.]. – М. : Высшая школа, 2004.
- 2 Техническая термодинамика [Текст] / 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 Измеритель теплоёмкости ИТ-с-400. Паспорт прибора [Текст]. – Актюбинск: Завод «Эталон», 1987.

Савельев Виктор Андреевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ, СЫПУЧИХ И  
ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы по курсам  
теплотехники, термодинамики и теплопередачи,  
гидрогазодинамики и тепломассообмену, теплофизики  
для студентов специальностей 190109.65, 190110.65,  
направлений 190600.62, 280700.62, 140400.62

Редактор А.С. Мокина

---

Подписано в печать 06.08.13	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл. печ. л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ 128	Тираж 25	Цена свободная

---

Редакционно-издательский центр КГУ.  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.  
Курганский государственный университет.