

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики, электротехники и автоматики

**методические указания к лабораторным работам по физике
для бакалавров всех направлений подготовки**

Лабораторная работа № 20

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

**Казань
2023**

УДК 535
ББК 23.343
Ф47

Ф47 Методические указания к лабораторным работам по физике для бакалавров всех направлений подготовки. Лабораторная работа № 20. Исследование теплоемкостей твердых тел / Сост.: В. Л. Фурер. Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2023.- 12 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В работе рассмотрен первый закон термодинамики и теплоемкости твердых тел. Приводится описание экспериментальной установки, на которой проводятся измерения теплоемкостей твердых тел.

Илл. 2, табл. 1

Рецензент
доцент кафедры химии и инженерной экологии в строительстве
Н.С. Громаков

УДК 535
ББК 23.343

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2023.

© Фурер В.Л., 2023.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.

Термодинамической системой называется совокупность большого числа частиц (атомов, молекул, ионов), которые находятся в тепловом движении и, взаимодействуя между собой, обмениваются энергиями. Примером термодинамических систем служат газы, жидкости, твёрдые тела. Состояние термодинамической системы характеризуется параметрами состояния. В качестве таких параметров обычно используют температуру, объем и давление.

Рассмотрим простейшую термодинамическую систему – идеальный газ. *Идеальным называют газ, в котором размеры молекул малы, силы притяжения между молекулами отсутствуют, столкновения молекул между собой и со стенками сосуда упругие.* Реальные газы при малых давлениях и не слишком низких температурах в достаточно хорошем приближении можно рассматривать как идеальные. Параметры идеального газа связаны друг с другом с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT, \quad (1)$$

где M – масса газа, μ – молярная масса (масса одного моля газа), R – универсальная газовая постоянная.

Числом степеней свободы i молекул называют число независимых механических движений, в которых они могут участвовать. Например, атом может двигаться относительно трех координатных осей X , Y и Z , и поэтому он обладает тремя степенями свободы поступательного движения ($i = 3$); жесткая двухатомная молекула может двигаться поступательно и вращаться относительно двух осей. Следовательно, она обладает пятью степенями свободы ($i = 5$).

Внутренней энергией термодинамической системы называют сумму кинетической энергии поступательного, вращательного и колебательного движений молекул и атомов и потенциальной энергии их взаимодействия. В идеальном газе притяжение между молекулами отсутствует. Поэтому их потенциальная энергия равна нулю. Тогда внутренняя энергия этого газа будет складываться из кинетических энергий отдельных молекул. Внутренняя энергия идеального газа вычисляется по формуле

$$U = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} RT. \quad (2)$$

Таким образом, внутренняя энергия данной массы идеального газа зависит только от температуры и не зависит от объема и давления.

Теплоемкостью C называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для нагревания системы на один градус

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (3)$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания системы, зависит от массы вещества. Поэтому вводят понятие удельной и молярной теплоемкости. *Удельная теплоёмкость c равна количеству теплоты, необходимому для нагревания единицы массы вещества на один градус. Молярная теплоёмкость C_μ равна количеству теплоты, необходимому для нагревания одного моля вещества на один градус.* Между двумя типами теплоёмкости существует взаимосвязь

$$C_\mu = \mu c. \quad (4)$$

Теплоемкость газов зависит от условий нагревания. Различают теплоемкости при постоянном давлении C_p и при постоянном объеме C_v .

Согласно закону Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{1}{2} kT, \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана. При колебаниях меняется кинетическая и потенциальная энергия, поэтому на каждую колебательную степень свободы приходится в среднем энергия, равная

$$\langle \varepsilon_{1\text{кол}} \rangle = kT. \quad (6)$$

Таким образом, средняя энергия молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT, \quad (7)$$

где i – сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы:

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{колеб}}. \quad (8)$$

Например, средняя кинетическая энергия одноатомных молекул идеального газа $i = i_{\text{пост}} = 3$ равна

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (9)$$

В качестве модели твердого тела рассмотрим кристаллическую решетку, в узлах которой расположены частицы (атомы, ионы, молекулы). У металлов узлы кристаллической решетки заполнены положительно заряженными иона-

ми. Между ионами беспорядочно движутся электроны. Ионы в кристаллической решетке колеблются около положений равновесия в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Они имеют три колебательные степени свободы, каждая из которых, согласно закону о равномерном распределении энергии по степеням свободы, обладает энергией kT .

Тогда среднее значение полной энергии частицы при колебательном движении в кристаллической решетке

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = 3kT. \quad (10)$$

Внутренняя энергия одного моля твердого тела равна произведению средней энергии одной частицы на число частиц, содержащихся в одном моле N_A :

$$U_\mu = \langle \varepsilon_0 \rangle \cdot N_A = 3kT \cdot N_A = 3RT, \quad (11)$$

где N_A – постоянная Авогадро, $R = k \cdot N_A$ – универсальная (молярная) газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К).

Для твердых тел, вследствие малого коэффициента теплового расширения, теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме практически не различаются. Поэтому, учитывая (11), молярная теплоемкость твердого тела

$$C_\mu = \frac{dU_\mu}{dT} = 3R. \quad (12)$$

Подставляя численное значение R , получим:

$$C_\mu = 3R \approx 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}. \quad (13)$$

Это равенство выполняется с довольно хорошим приближением для многих веществ, при комнатной температуре, и называется законом Дюлонга и Пти: *молярная теплоемкость всех химически простых кристаллических твердых тел приблизительно равна 25 Дж/(моль·К)*.

При понижении температуры теплоемкости твердых тел уменьшаются, приближаясь к нулю при $T \rightarrow 0$. Вблизи абсолютного нуля молярная теплоемкость тел пропорциональна T^3 , и только при достаточно высокой, характерной для каждого вещества температуре, начинает выполняться равенство (13). Эти особенности теплоемкостей твердых тел при низких температурах можно объяснить с помощью квантовой теории теплоемкости, созданной Эйнштейном и Дебаем.

Для экспериментального определения теплоемкости исследуемое тело помещается в калориметр, который нагревается электрическим током. При прохождении электрического тока выделяется количество теплоты:

$$Q = IU\tau, \quad (14)$$

где I и U – ток и напряжение нагревателя; τ – время нагревания;

Если температуру калориметра с исследуемым образцом очень медленно увеличить на ΔT , то энергия электрического тока пойдет на нагревание образца и калориметра:

$$IU\tau = m_0c_0\Delta T + mc\Delta T + \Delta Q, \quad (15)$$

m_0 и m – массы калориметра и исследуемого образца, c_0 и c – удельные теплоемкости калориметра и исследуемого образца, ΔQ – потери тепла в калориметре и в окружающее пространство.

Для исключения из уравнения (15) количества теплоты ΔQ необходимо при той же мощности нагревателя нагреть пустой калориметр (без образца) от начальной температуры T_0 на ту же разность температур ΔT . Потери тепла в обоих случаях будут практически одинаковыми и очень малыми, если температура защитного кожуха калориметра в обоих случаях постоянная и равна комнатной:

$$IU\tau_0 = m_0c_0\Delta T + \Delta Q, \quad (16)$$

Из уравнений (15) и (16) вытекает

$$IU(\tau - \tau_0) = mc\Delta T. \quad (17)$$

Уравнение (17) может быть использовано для экспериментального определения удельной теплоемкости материала исследуемого образца.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из измерительного модуля и калориметра (рис. 1). В калориметре производится нагрев и охлаждение образца до комнатной температуры.

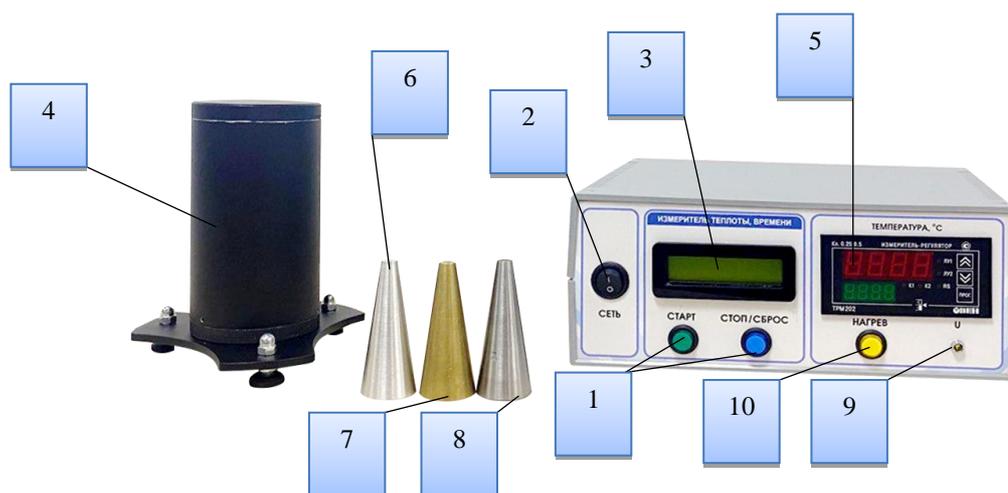


Рис.1

1 – кнопки управления измерителем теплоты/времени; 2 – кнопка включения; 3 – цифровой индикатор количества теплоты и времени нагрева; 4 – калориметр; 5 – цифровой измеритель температуры; 6 – образец из алюминия; 7 – образец из латуни; 8 – образец из стали; 9 – индикатор включения нагревательного элемента; 10 – кнопка включения нагрева.

На лицевой панели расположены цифровые приборы для измерения температуры образцов T , времени τ и количества теплоты Q , затраченной на нагрев.

Для начала работы с оборудованием на лицевой панели расположен кнопочный выключатель «СЕТЬ». Кнопка «НАГРЕВ» предназначена для начала процесса нагрева образца, кнопкой «СТАРТ» запускается в работу ваттметр. Кнопкой «СТОП» прекращаются измерения. При повторном нажатии на кнопку «СТОП» сбрасываются показания ваттметра.

Масса образцов равна: Сталь – 254 г; Латунь – 278 г; Алюминий – 92 г.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Измерение температуры производится цифровым измерителем-регулятором температуры ТРМ1, который имеет три режима:

1. Рабочий режим. Горит индикатор «К». В данном режиме отображается температура калориметра.

2. Режим установки температуры нагрева. Горят индикаторы «Т» и «К». В данном режиме отображается температура нагревателя. Температура нагрева может быть установлена путем нажатия кнопок « $\hat{=}$ » и « $\hat{>}$ ».

3. Режим установки нагревателя. Горят индикаторы «Δ» и «К». Данный режим необходим для настройки нагревателя. Установленное значение (0,1) не изменять!

Переключение между режимами осуществляется кнопкой «ПРОГ.» на измерителе-регуляторе.

1. Включите установку тумблером «СЕТЬ». Измеритель-регулятор должен работать в первом режиме, индикатор «К» должен гореть. Если горят иные индикаторы, переключите режим кнопкой «ПРОГ.».

2. Поместите исследуемый образец из алюминия в калориметр;

3. Определите начальную температуру $T_{нач}$ образца.

4. Зафиксируйте $T_{нач}$.

5. На измерителе-регуляторе выберите второй режим работы, нажав кнопку «ПРОГ.», и установите максимальную температуру нагревателя 80°C , путем нажатия кнопок « $\hat{=}$ » и « $\hat{>}$ ». Вернитесь в первый режим работы измерителя-регулятора, повторным нажатием кнопки «ПРОГ.».

6. Для регистрации теплоты нагрева одновременно с кнопкой «НАГРЕВ» нажмите на кнопку «СТАРТ». На цифровом индикаторе будут отображаться значения времени и количества теплоты нагрева;

7. Следите за показаниями на табло «ТЕМПЕРАТУРА». Дождитесь, когда показания температуры увеличатся на 2 градуса от начальной $T_{нач}$, запишите показания теплоты нагрева. Далее производите запись показаний теплоты нагрева через каждые 2 градуса, пока температура не увеличится на 20 градусов

от начальной $T_{нач}$. Нажмите кнопку «СТОП/СБРОС» измерение теплоты нагрева прекратится;

8. Запишите показания температуры $T_{конеч}$;

9. Для сброса показателей нажмите кнопку «СТОП/СБРОС» повторно;

10. Выключите установку тумблером «СЕТЬ».

11. Используя данные о количестве теплоты, израсходованной на нагрев, вычислите удельную теплоемкость образца. Для этого используйте следующие формулы:

$$IU(\tau - \tau_0) = mc\Delta T,$$

$$IU\tau = Q, \quad IU\tau_0 = Q_0,$$

$$\Delta T = T_{конеч} - T_{нач},$$

где Q – количество энергии затраченной на нагрев образца и калориметра, $Q_0 = 9,2$ КДж – количество энергии затраченной на нагрев пустого калориметра на 20° С, $T_{нач}$ – начальная температура, $T_{конеч}$ – конечная температура.

По результатам измерений, пользуясь формулой, вычислить значения теплоемкости твердых тел:

$$c = \frac{Q - Q_0}{m\Delta T}$$

Определите удельную теплоемкость образца алюминия при комнатной температуре. Сравните полученное значение теплоемкости с табличным значением. С учетом того, что молярная масса алюминия равна $0,027$ кг/моль, рассчитайте его молярную теплоемкость и сопоставьте ее с предсказаниями закона Дюлонга-Пти.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется молярной теплоемкостью?
2. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона. В чем смысл этого уравнения?
3. Как вычисляется внутренняя энергия идеального газа и твердого тела?
4. Дайте определения теплоемкости, удельной и молярной теплоемкости.
5. Что называется числом степеней свободы? Чему оно равно для двухатомного газа и твердого тела?
6. Сформулируйте теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы.
7. Сформулируйте и запишите закон Дюлонга и Пти.
8. Получите формулу для расчёта теплоемкости твердых образцов.
9. Опишите порядок измерения теплоемкости твердых тел.

Таблица 1

t°, C	20	22	24	26	28	30	32	34
Q, КДж								

Методические указания к лабораторным работам по физике
для бакалавров всех направлений подготовки

Лабораторная работа № 20

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Составитель: Фурер Виктор Львович

Редактор Л.З. Ханафиева

Издательство

Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подписано в печать 05.10.23

Формат 60-84/16

Заказ № 281

Печать ризографическая

Усл.-печ. л. 0,7 Тираж

50 экз.

Бумага офсетная № 1

Уч. - изд. л. 0,7

Отпечатано в полиграфическом секторе

Издательство КГАСУ

420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1
