

Министерство образования и науки РФ

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

Иркутский государственный университет

Определение макро- и микро-характеристик твердых тел

Методические указания

Иркутск 2005

Составители: к.ф.-м.н., доц. Алексеева Л.И.
д.ф.-м.н., проф. Кирнберг И.А.
(кафедра общей и космической физики)

Рецензент: д.т.н., проф. Щербаченко Л.А.
(кафедра общей физики)

Кратко рассматриваются вопросы молекулярно-кинетического строения вещества. Студентам предлагается экспериментально измерить и рассчитать теоретически некоторые макро- и микрохарактеристики твердого тела.

Предназначена для студентов 1 курса
естественных факультетов

Определение макро- и микро- характеристик твердых тел

Внимание! Соблюдайте осторожность при работе

со стеклянной мензуркой.

Цель работы: Познакомиться со способом определения и вычисления макро- и микрохарактеристик твердого тела.

Приборы и принадлежности: технические весы с разновесом, мензурка с ценой деления 1 или 0,5 мл., ситечко, термометр, исследуемые тела.

Краткая теория:

Твердые тела (кристаллы) характеризуются наличием значительных сил межмолекулярного взаимодействия и сохраняют постоянным как объем, так и форму. Кристаллы имеют правильную геометрическую форму, т.е. сохраняется дальний порядок. Расположение частиц, характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях, называется *кристаллической решеткой*.

В узлах кристаллической решетки металлов располагаются положительные ионы, а валентные электроны, сравнительно слабо связанные с ядром атома, отделяются и коллективизируются. Теперь они принадлежат всему кристаллу в целом. Таким образом, в металлах между положительными ионами хаотически движутся свободные электроны, наличие которых обеспечивает хорошую электропроводимость. Большинство

металлов имеет кубическую решетку. Чаще всего металлы встречаются в виде поликристаллов.

В качестве модели твердого тела можно рассматривать кристаллическую решетку, в узлах которой частицы, принимаемые за материальные точки, колеблются около своих положений равновесия (узлов решетки) в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом, каждой составляющей кристаллическую решетку частице приписывается три колебательных степени свободы.

Числом степеней свободы (i) – называется число независимых координат, полностью определяющих движение тела в пространстве. Так, например, для описания движения одноатомного газа достаточно трех степеней свободы поступательного движения ($i=3$). Молекула двухатомного газа рассматривается как совокупность двух материальных точек – атомов, жестко связанных между собой. Это система кроме трех степеней свободы поступательного движения имеет еще две степени свободы вращательного движения, т.е. всего $i=5$ степеней свободы. Трехатомная молекула имеет шесть степеней свободы ($i=6$): три поступательных и три вращательных.

Если атомы в молекуле связаны не жестко, то они могут участвовать еще и в колебательном движении относительно друг друга. Колебательная степень свободы обладает вдвое большей энергией, так как на нее приходится не только кинетическая энергия, как в случае поступательного и вращательного движения, но и потенциальная энергия. Причем средние значения кинетической и потенциальной энергии одинаковы. Тогда общее число степеней свободы молекулы:

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{колеб}} .$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории связывает параметры состояния газа (давление P , объем V , температуру T) с характеристиками движения его

молекул $(m_o, n_{кв}, e_o)$, т.е. связывает макро- и микрохарактеристики газа:

$$P = \frac{1}{3} n m_o n_{кв}^2 = \frac{2}{3} n \frac{m_o n_{кв}^2}{2} = \frac{2}{3} n e_o, \quad (1)$$

где m_o - масса одной молекулы, $n_{кв}$ - средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул, e_o - средняя кинетическая энергия одной молекулы. $n = N / V$ - число частиц в единице объема. Тогда

$$PV = \frac{2}{3} N \frac{m_o n_{кв}^2}{2} = \frac{2}{3} E, \quad (2)$$

где E - суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул.

С другой стороны, по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{M} RT = uRT.$$

(3)

Приравняв правые части выражений (2) и (3), получим:

$$E = \frac{3}{2} uRT = \frac{3}{2} u N_A \frac{R}{N_A} T = \frac{3}{2} NkT,$$

(4)

где m - масса вещества, $M = m_o N_A$ - молярная масса, $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ - число Авогадро, $R = 8.31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ - универсальная газовая постоянная, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ - постоянная

Больцмана; $u = \frac{m}{M}$ - количество вещества (число молей) – физическая величина, определяемая числом структурных элементов (молекул, атомов или ионов), из которых состоит вещество; в одном моле вещества содержится N_A структурных единиц. Тогда из (4) следует, что энергия одной молекулы одноатомного газа ($i=3$) равна

$$e_o = \frac{E}{N} = \frac{3}{2} kT \quad \text{или} \quad e_o = \frac{i}{2} kT .$$

(5)

Следовательно, средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа пропорциональна термодинамической температуре и зависит только от нее. Ни одна из поступательных степеней свободы не имеет преимущества перед другими. Поэтому на каждую из них приходится в среднем одинаковая энергия, равная $\frac{1}{3} e_o$, т.е. $e_1 = \frac{1}{2} kT$.

В классической статистической физике выводится закон Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы: *для статистической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия $kT / 2$, а на каждую колебательную степень свободы – в среднем энергия kT .*

Следовательно, в твердых телах частицы, участвующие только в колебательном движении имеют три степени свободы ($i=3$), каждая из которых согласно закону равного распределения энергии по степеням свободы, обладает энергией kT . Итак, средняя энергия колебательного

движения структурной частицы в твердом теле равна

$$e_o = \frac{m_o n^2}{2} = 3kT \quad (6)$$

Тогда внутренняя энергия одного моля твердого вещества $U_M = e_o \cdot N_A = 3kN_A T = 3RT$, а

$$(7) \quad \text{теплоемкость}$$

$$C_n = \frac{dU_M}{dT} = 3R \approx 25 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \quad \text{т.е.}$$

молярная теплоемкость химически простых тел в кристаллическом состоянии одинакова, равна $3R$ и не зависит от температуры.

Этот закон был эмпирически получен французскими учеными Дюлонгом и Пти. Как показывают опытные данные (табл. 1) для многих простых веществ этот закон выполняется с довольно хорошим приближением при комнатной температуре. Если твердое тело является химическим соединением, то число частиц в моле равно

nN_A , где n - число атомов в молекуле, т.е. молярная теплоемкость твердых химических соединений

$C_n = 3nR \approx 25n$. Например, для NaCl число частиц в

моле равно $2N_A$ и

$$C_n \approx 2 \cdot 25 = 50 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Таблица 1

Вещество		$C_n, \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	
		Теория	Опыт
Алюминий	Al	25	25.5
Железо	Fe	25	26.8
Серебро	Ag	25	25.6

Свинец	Pb	25	26.3
Олово	Sn	25	25.4
Каменная соль	NaCl	50	50.6

Если твердое тело состоит из $N = uN_A$ структурных единиц, то оно вследствие теплового колебательного движения частиц обладает внутренней энергией, зависящей от температуры $U = E = 3NkT = 3uRT = 25uT$
(8)

Порядок выполнения работы

1. Взвесить на технических весах исследуемое тело, его массу m в кг.
2. Определить цену деления мензурки.
3. Опустить ситечко в мензурку, налить воду примерно до половины, взять отсчет h_1 с точностью до 0,05 мл.
4. С помощью ситечка аккуратно опустить тело в воду, выдержать 10-15 минут для установления теплового равновесия и взять новый отсчет h_2 .
5. Вычислить объем V погруженного тела в мл и м³.
6. Опустить термометр в воду и определить температуру в $t^{\circ}C$ и $T=t+237 K$.
7. Все полученные результаты занести в табл. 2.

Вычисления

1. Вычислить плотность вещества $\rho = \frac{m}{V}$ и по табличным данным определить, какое это вещество.
2. По таблице Менделеева определить молярную массу M этого вещества.
3. Рассчитать число молей вещества $\nu = \frac{m}{M}$ и общее число частиц $N = \nu N_A$.
4. Определить массу структурной частицы двумя способами: 1) по формуле $m_o = \frac{M}{N_A}$; 2) через число протонов и нейтронов в атоме исследуемого вещества $m_o = (N_p + N_n) \cdot 1a.e.m(кг)$. Сравнить полученные значения.
5. По формуле $V_1 = \frac{V}{N}$ оценить объем одной структурной единицы исследуемого вещества и ее линейные размеры $l_1 = \sqrt[3]{V_1} (м)$.
6. По формуле (6) определить среднюю энергию частиц (e_o) и среднюю скорость колебательного движения (n) .
7. По формуле (7) и (8) оценить внутреннюю энергию одного моля (U_M) и всего исследуемого твердого тела (U) .

Таблица 2

m	h_1	h_2	V	r	T	M	u	N	m_o	V_1	l_1	e_o	n_o	U_M	U
кг	мл	мл	м ³	кг/м ³	К	кг/ мол ь	мол ь		кг	м ³	м	Дж	м/с	Дж	Дж

Контрольные вопросы

1. Какие из найденных величин являются макро-, а какие микрохарактеристиками исследуемого вещества?
2. На каком законе основан метод определения объема тела произвольной формы? Как он читается?
3. Расскажите о строении металла, в каком движении участвуют частицы, что происходит с веществом, если его немного нагреть? От чего зависит его внутренняя энергия?
4. Что называют числом степеней свободы?
5. Сформулируйте закон Больцмана?

Литература

Трофимова Т.И. Курс физики: Учебник для студ. вузов. – М.: Высш. шк. 2002. – 432 с.

