

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Московский энергетический институт  
(технический университет)  
Волжский филиал

Кафедра общетехнических дисциплин

В.П.Мельников, С.В.Кулешина

**Лабораторная работа № 12.**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ  
И ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОЛОВА**

Методические указания к выполнению  
лабораторной работы № 12 по курсу “Физика”

Рецензент:

Петухов И.М., кандидат технических наук, доцент кафедры СД

В. П. Мельников, С. В. Кулешина,

Лабораторная работа № 12. Определение удельной теплоты кристаллизации и изменение энтропии при охлаждении олова.

Методические указания к выполнению лабораторной работы № 12 по курсу “Физика”.

При выполнении лабораторной работы студенты экспериментально определяют теплоту кристаллизации олова из закона сохранения энергии, знакомятся с методами измерения температуры в процессе кристаллизации.

Предназначено для студентов I курса всех специальностей дневного и вечернего обучения.

### Определение удельной теплоты кристаллизации и изменения энтропии при охлаждении олова

#### 1. Цель работы

Определение изменения энтропии при фазовом переходе первого рода на примере кристаллизации олова из расплава при его охлаждении. Определение теплоты кристаллизации олова из закона сохранения энергии.

#### 2. Теоретические основы работы

Кристаллизация- процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое. Процесс кристаллизации связан с выделением количества теплоты, равного теплоте плавления. Для химически чистых веществ процесс кристаллизации протекает при постоянной температуре, равной температуре плавления.

В процессе кристаллизации упорядочивается движение частиц жидкости, постепенно прекращается перемещение молекул, возникают связанные тепловые колебания относительно узлов кристаллической решетки.

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы в жидкости имелись центры кристаллизации – неоднородности, вокруг которых начинается процесс образования твердой фазы. Если в жидкости отсутствуют центры кристаллизации, то она может быть охлаждена до температуры более низкой, чем температура кристаллизации. В обычных условиях это, как правило, не происходит.

Количество теплоты, которое необходимо отвести от единицы массы жидкости при температуре кристаллизации для перехода жидкости в твердое состояние, называется удельной теплотой кристаллизации  $\lambda_{кр}$ . Из первого начала термодинамики  $\delta Q = dU + \delta A$  следует:

$$\lambda_{кр} = U_{тв} - U_{ж} + p(V_{тв} - V_{ж}) \quad [2.1]$$

Здесь  $U_{тв}$ ,  $U_{ж}$  -внутренняя энергия единицы массы в твердом и жидком состоянии;

$V_{тв}$ ,  $V_{ж}$  -удельный объем твердой и жидкой фазы соответственно;  
 $p$ - давление в процессе кристаллизации.

Поскольку при переходе из жидкого в твердое состояние объем олова практически не меняется, имеем  $p(V_{тв} - V_{ж}) \ll U_{тв} - U_{ж}$ . В этом случае

$$\lambda_{кр} \approx U_{тв} - U_{ж} \quad [2.2]$$

Энтропия - функция состояния термодинамической системы. Изменение энтропии в равновесном процессе равно отношению количества теплоты, сообщенного системе, к термодинамической температуре системы:  $dS = \frac{\delta Q}{T}$ .

Энтропия определяется с точностью до постоянной. Разность энтропий в двух состояниях при обратимом процессе равна:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad [2.3]$$

Здесь  $\delta Q$  - элементарное количество теплоты, полученное или отданное при бесконечно малом изменении параметров термодинамической системы;  $T$  - температура. В процессе кристаллизации олово отдает тепло окружающей среде при  $T = const$ . При этом количество теплоты, отданное окружающей среде:

$$Q = \lambda_{кр} m_0 \quad [2.4]$$

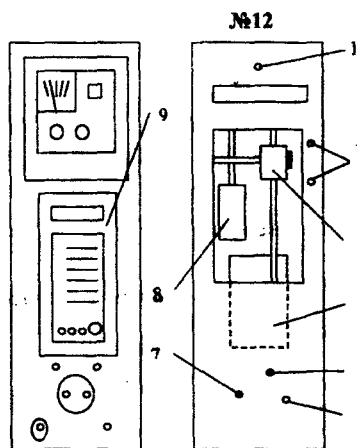
Здесь  $m_0$  - масса олова. Так как  $Q$  - количество теплоты, отданное окружающей среде, то  $Q < 0$ , из (2.3) и (2.4) следует что

$$S_2 - S_1 = \frac{\lambda_{кр} m_0}{T_{кр}} \quad \text{или} \quad S_2 - S_1 = \frac{U_{кр} - U_{ж}}{T_{кр}} m_0 \quad [2.5]$$

В процессе кристаллизации происходит упорядочивание структуры вещества, внутренняя энергия вещества уменьшается, что и приводит к уменьшению энтропии системы.

### 3. Описание установки. Вывод расчетных формул

Рис. 3.1



Экспериментальная установка состоит из функционального модуля 12 (рис. 3.1) и приборного модуля.

На передней панели функционального модуля расположены крепежный винт 1, табличка с названием работы, гнезда 2 для подключения мультиметра приборного модуля, устройство подъема 3, ампулы с оловом 8 из электропечи 4, тумблер включения электропитания печи 5, сигнальная лампа включения электропитания 6, сетевой шнур 7 для подключения модуля к электророзетке приборного модуля.

В электрическую печь 4 помещается ампула с оловом 8. Внутри ампулы находится

металлическая трубка-чехол с дифференциальной хромель-копелевой термопарой, горячий спай которой находится в ампуле, а холодный спай – на воздухе. Концы термопары через гнезда и медные провода соединены с милливольтметром 9, измеряющим возникающую термо ЭДС.

Простейшей моделью охлаждения тела является охлаждение в среде с постоянной температурой  $T$  (в термостате). Если процесс охлаждения происходит достаточно медленно, температуру произвольной точки тела в каждый момент времени можно считать одинаковой. Такой процесс охлаждения состоит из непрерывно следующих друг за другом равновесных состояний и, следовательно, является квазистатическим обратимым процессом.

Применим закон сохранения энергии к квазистатическому процессу охлаждения твердого олова после кристаллизации:

$$(c_0 m_0 + c_a m_a) dT + \alpha F (T - T_{cp}) d\tau = 0 \quad [3.1]$$

Здесь  $(c_0 m_0 + c_a m_a) dT < 0$  - количество теплоты, отданное телом среде при его охлаждении за время  $d\tau$ ;  $\alpha F (T - T_{cp}) d\tau > 0$  - количество теплоты, полученное окружающей средой через поверхность ампулы площадью  $F$  за время  $d\tau$ . В [3.1]

$c_0, c_a$  - удельные теплоемкости олова и материала ампулы,  $m_0, m_a$  - массы олова и ампулы;  $T$  - температура твердого олова;  $T_{cp}$  - температура окружающей среды;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи с поверхности ампулы в окружающую среду. В дальнейшем считаем, что значение  $\alpha$  в течение всего опыта постоянно.

Применяя закон сохранения энергии к процессу кристаллизации олова, можно получить уравнение

$$\lambda_{kp} m_0 + \alpha F (T_{kp} - T_{cp}) \Delta \tau = 0 \quad [3.2]$$

Здесь  $Q = \lambda_{kp} m_0$  - количество теплоты, отданное оловом при его кристаллизации за время кристаллизации  $\Delta \tau$ . Так как тепло отдано окружающей среде то  $Q < 0$ . Второй член суммы в (3.2);  $\alpha F (T_{kp} - T_{cp}) \Delta \tau > 0$  - количество теплоты, полученное окружающей средой через поверхность ампулы за время кристаллизации.

Из соотношений (3.1) и (3.2) следует:

$$\lambda_{kp} = (c_0 m_0 + c_a m_a) \frac{\Delta \tau}{m_0} \frac{T_{kp} - T_{cp}}{T - T_{cp}} \frac{dT}{d\tau} \quad [3.3]$$

Следовательно,

$$S_2 - S_1 = \frac{\lambda_{kp} m_0}{T_{kp}} \quad [3.4]$$

для определения  $S_2 - S_1$  необходимо измерить температуру кристаллизации  $T_{кр}$ , время кристаллизации  $\Delta\tau$ , а также вычислить производную  $\frac{\partial T}{\partial \tau}$  функции  $T = f(\tau)$  во время охлаждения твердого олова после полной кристаллизации. Эти величины можно найти, измеряя температуру олова в процессе охлаждения от полного расплава до температуры остывшего олова  $T_0$  в конце опыта.

Реальный процесс охлаждения сопровождается явлениями, вносящими погрешность в определение  $\lambda_{кр}$ . Главными источниками погрешности являются:

- Отклонение процесса охлаждения от квазистатического
- Изменение температуры окружающей среды

Эти процессы приводят к методической погрешности определения  $\lambda_{кр}$ , не превышающей  $\pm 10\%$ .

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Выписать данные установки.
2. С помощью подъемного устройства 3 опустить ампулу с оловом 8 в электропечь 4.
3. Соединить нагреватель с помощью электрического шнура 7 с сетевым разъемом стенда.
4. Подключить мультиметр 9 к гнездам 2 функционального модуля.
5. Включить стенд.
6. Включить мультиметр и нагреватель 4 (с помощью тумблера 5).
7. Проследить в течение 7-8 минут за тем, чтобы олово, находящееся в ампуле, расплавилось. Процесс плавления олова происходит при постоянной температуре – температуре плавления  $T_m$ . При этом показания милливольтметра практически не изменяются. Окончание процесса плавления можно определить как момент времени, после которого показания милливольтметра начинают возрастать.

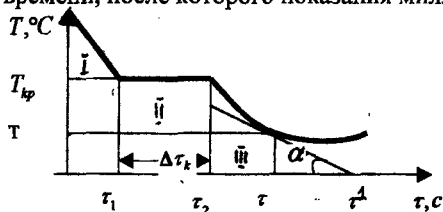


Рис. 4.1

8. Через 1-2 минуты после окончания процесса плавления олова отключить электрический нагреватель
9. Отвернуть винт ползунка 3, поднять ампулу 8 из печи 4, закрепить ампулу в верхнем положении винтом.

Включить секундомер и через каждые 15 секунд снимать показания милливольтметра  $\Delta E$ , фиксирующего разность температур олова и окружающей среды  $\Theta = T - T_{cp}$ . Измерения

продолжать до тех пор, пока не будут пройдены (рис.4.1):

- Область I – область полного расплава
- Область II – область кристаллизации

- Область III – область охлаждения твердого олова ( $\Delta\tau_k = \tau_2 - \tau_1$  – время кристаллизации)
10. Получив 30-40 экспериментальных точек, выключить милливольтметр и стенд.

### 5. Данные установки и таблица результатов измерений

- масса олова  $m_o = 50\text{г}$
- масса ампулы  $m_a = 59,5\text{г}$
- удельная теплоемкость олова  $C_o = 220 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- удельная теплоемкость ампулы  $C_a = 492 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- температура окружающей среды  $T_{cp} = \text{ }^\circ\text{C}$

Таблица 1

№ опыта	$\Delta E, \text{мВ}$	$\Theta, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau, \text{с}$	$T = \Theta + T_{cp}, \text{ }^\circ\text{C}$

### 6. Графическая обработка результатов измерений

1. Определить по лабораторному термометру температуру окружающей среды -  $T_{cp}$
2. По зафиксированным показаниям мультиметра  $\Delta E$  и таблице П.1 определить разность температур олова и окружающей среды  $\Theta$  в соответствующие моменты времени процесса охлаждения
3. Определить температуру олова  $T = \Theta + T_{cp}$
4. Построить график зависимости  $T = f(\tau)$
5. Определить по графику время кристаллизации олова  $\Delta\tau$  и температуру кристаллизации  $T_{kp}$
6. В области охлаждения твердого олова III выбрать произвольную точку  $(\tau, T)$  и провести касательную к линии графика
7. Для выбранной точки определить  $\frac{dT}{d\tau} = \text{tg}\alpha = \frac{T}{\tau^1 - \tau}$
8. Полученное значение  $\frac{dT}{d\tau}$  и соответствующее этой величине значение температуры  $T$  подставить в формулу [3.3] и определить удельную теплоту кристаллизации.

9. По формуле [3.4] рассчитать изменение энтропии  $S_2 - S_1 = \frac{\lambda_{кр} m_0}{T_{кр}}$

### Контрольные вопросы

1. Что называется удельной теплотой кристаллизации?
2. Что такое энтропия?
3. Сформулируйте первое начало термодинамики.
4. Начертить график охлаждения олова. Указать  $T_{кр}$ ,  $\Delta\tau$ .
5. Чему равно количество теплоты, выделяемое при кристаллизации?
6. Как определяется температура  $T_{кр}$ , время  $\Delta\tau$ ,  $\frac{dT}{d\tau}$  в формуле при вычислении  $\lambda_{кр}$ ?
7. Как измеряется температура олова?

Приложение

### Градуировочная характеристика хромель-копелевой термопары (по СТ СЭВ 1059-78)

Таблица П.1

$t, ^\circ\text{C}$	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,580
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
60	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	5,328	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	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	8,665	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	10,016	10,092	10,168	10,244	10,320	10,396	10,472	10,548
150	10,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,316
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,196	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777



## Литература

1. *Савельев И.В.* Общий курс физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1986. с. 346-350.
2. *Детлаф А.А.* Курс физики. Т. 1. М.: Высшая школа. 1973. с.338 - 342.
3. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. 1979. с. 126-129, 452-453.

## Содержание

1. Цель работы.....	2
2. Теоретические основы работы.....	2
3. Описание установки. Вывод расчетных формул .....	3
4. Порядок выполнения работы.....	5
5. Данные установки и таблица результатов.....	6
6. Графическая обработка результатов измерений.....	6
Контрольные вопросы.....	7
Приложение.....	7
Литература.....	8

Лабораторная работа № 12  
Определение удельной теплоты кристаллизации  
и изменения энергии при охлаждении олова

Методические указания к выполнению  
лабораторной работы № 12 по курсу “Физика”

В.П.Мельников, С.В.Кулешина

Редактор Г.П.Халдеева  
Компьютерная верстка Т.К.Вдовенко

Подписано в печать 05.06.00 Формат 60x90  $\frac{1}{16}$ .  
Усл. печ. л. 0.4 .Тираж 50 экз. Заказ 6

Издатель: ВФ МЭИ, 404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69  
Отпечатано: ВФ МЭИ, 404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69