

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель Отделения  
Экспериментальной физики ТПУ

 А.М. Лидер  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ  
НАГРЕВАНИИ И ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА**

Методические указания к выполнению лабораторной работы № 1-36  
по курсу «Общая физика» для студентов всех направлений и  
специальностей

*Составитель: Т.Н. Мельникова*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2022

УДК 536.34

ББК 31.3

**Определение изменения энтропии при нагревании и плавлении олова:** методические указания к работе № 1-36 по курсу «Физика 1» для студентов всех направлений и специальностей / сост. Т.Н. Мельникова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 10 с.

В методических указаниях изложены теория и практическая часть проведения лабораторной работы по изменению энтропии.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром Отделения  
Экспериментальной Физики  
«\_\_\_\_\_» 2022 г.

Председатель

учебно-методической комиссии

 А.М. Лидер

*Рецензенты*

Старший преподаватель

Отделения Естественных Наук ТПУ

*Т.В. Смекалина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ И ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА

**Цель работы:** экспериментально определить изменения энтропии при фазовом переходе первого рода на примере плавления олова.

**Приборы и принадлежности:** комплект учебного-лабораторного оборудования «Изменение энтропии», включающий в себя встроенный секундомер, тигель, печь, оловянный образец, кулер.

### КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Понятие энтропии введено в 1865 г. Р. Клаузиусом. Для выяснения физического содержания этого понятия рассматривают отношение теплоты  $Q$ , полученной телом в изотермическом процессе, к температуре  $T$  теплоотдающего тела, называемое **приведенным количеством теплоты**.

Процесс плавления и последующего охлаждения олова можно представить на графике зависимости его температуры от времени нагревания (рис. 1). По мере сообщения теплоты температура олова сначала повышается (участок 1-2), а затем, когда олово нагреется до температуры плавления  $T_{пл}$  (участок 2-3), несмотря на продолжающееся нагревание, его температура остается неизменной. Когда олово полностью расплавится, температура жидкого олова будет снова повышаться (участок 3-4).

При охлаждении расплавленного олова температура сначала понижается (участок 4-5), затем начинается кристаллизация (участок 5-6), которая происходит также при неизменной температуре.

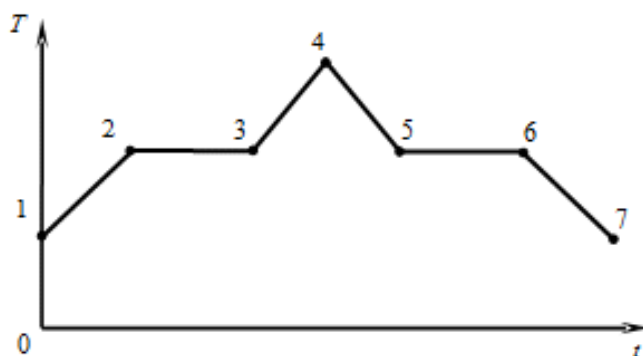


Рис. 1

Плавление (кристаллизация) представляют собой фазовый переход вещества из твердой фазы в жидкую (и наоборот). Фазовый переход 1 рода сопровождается поглощением или выделением теплоты при неизменной температуре. Вся поглощенная при плавлении теплота пойдет на совершение работы по разрушению кристаллической решетки, поэтому температура остается постоянной до тех пор, пока не

расплавится весь кристалл. Дальнейшее нагревание пойдет на увеличение кинетической энергии молекул жидкого олова, и температура снова будет повышаться. При охлаждении температура будет понижаться до тех пор, пока не начнется кристаллизация. Выстраивая кристаллическую решетку, атомы олова возвращают в виде теплоты ту энергию, которая была затрачена на ее разрушение при плавлении. Таким образом,  $T_{\text{пл}} = T_{\text{кр}}$ .

Для того, чтобы расплавить некоторую массу вещества  $m$ , находящуюся при температуре плавления  $T_{\text{пл}}$ , необходимо затратить количество теплоты

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота плавления данного вещества.

Энтропия  $S$  является функцией состояния термодинамической системы, дифференциал  $dS$  которой при обратимом процессе равен отношению бесконечно малого количества теплоты  $\delta Q$ , сообщенного системе, к термодинамической температуре  $T$  системы:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}.$$

Энтропия всегда определяется с точностью до постоянной величины, поэтому смысл имеет лишь ее изменение при переходе системы из состояния 1 в состояние 2:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (2)$$

Процесс плавления олова протекает при постоянной температуре  $T = T_{\text{пл}}$  и, следовательно, является изотермическим. Изменение энтропии при таком процессе, учитывая (1), можно найти по формуле:

$$\Delta S_{\text{пл}} = \frac{1}{T} \int_1^2 \delta Q_{\text{пл}} = \frac{Q_{\text{пл}}}{T_{\text{пл}}} = \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}}. \quad (3)$$

Из выражения (2) вытекает, что изменение энтропии  $\Delta S_{\text{н}}$  при нагревании олова от начальной температуры  $T_0$  до температуры плавления  $T_{\text{пл}}$  и с учетом того, что

$$\delta Q_{\text{н}} = cm dT,$$

(где  $c$  – удельная теплоемкость олова)

$$\Delta S_{\text{н}} = \int_{T_0}^{T_{\text{пл}}} \frac{\delta Q_{\text{н}}}{T} = cm \ln \left( \frac{T_{\text{пл}}}{T_0} \right). \quad (4)$$

Следовательно, изменение энтропии при нагревании и плавлении олова можно определить:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{н}} + \Delta S_{\text{пл}} = \int_{T_0}^{T_{\text{пл}}} \left( \frac{\delta Q_{\text{н}}}{T} + \frac{\delta Q_{\text{пл}}}{T} \right)$$

или

$$\Delta S = cm \ln \left( \frac{T_{\text{пл}}}{T_0} \right) + \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}}.$$

Формула может быть использована для экспериментального определения изменения энтропии при нагревании и плавлении олова после измерения значения температур  $T_0$  и  $T_{\text{пл}}$ .

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для определения изменения энтропии при нагревании и плавлении олова используется комплект учебно-лабораторного оборудования «Изменение энтропии», предназначенный для проведения работ по определению по изменению энтропии при нагревании и плавлении оловянного сплава (ПОС-61).

Расшифровка аббревиатуры: ПОС – припой оловянно-свинцовый. 61 – массовая доля олова в составе. Его температура плавления равна 184 °С, в то время как температура плавления олова 232 °С.

На рис. 2 представлен внешний вид установки.



Рис. 2

Тигель предназначен для нагрева и плавления исследуемого образца. Для этого тигель с исследуемым веществом помещают в печь. С целью обеспечения безопасной работы на установке печь прикрывают крышкой (рис. 3).

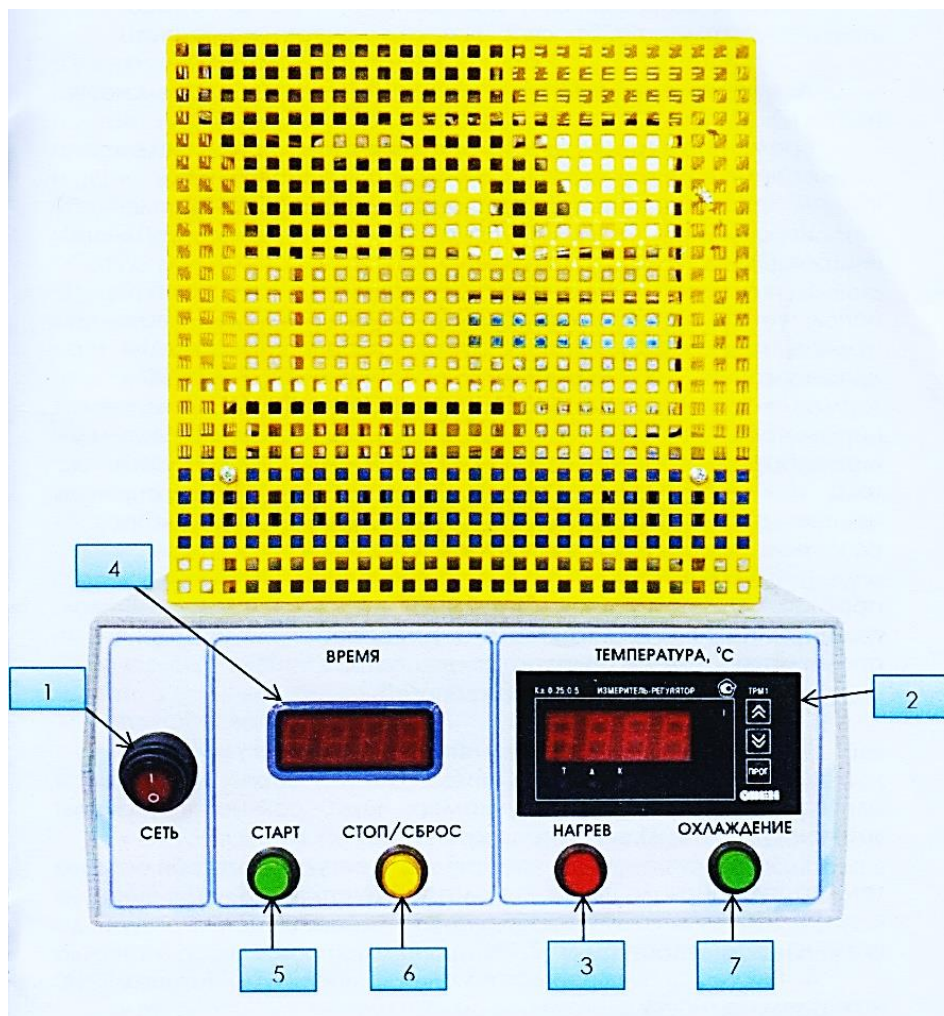


Рис. 3

- 1 – кнопка включения/выключения «Сеть»;
- 2 – измеритель – регулятор;
- 3 – кнопка включения/выключения нагрева;
- 4 – панель индикации секундомера;
- 5 – кнопка запуска секундомера «Старт»;
- 6 – кнопка остановки секундомера «Стоп», кнопка сброса секундомера «Сброс»;
- 7 – кнопка включения/выключения охлаждения.

### ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Соблюдайте общие правила техники безопасности при использовании электрических приборов.

2. Не загромождайте рабочее место посторонними предметами и будьте аккуратны со стеклянными сосудами.
3. Перед началом эксплуатации оборудования необходимо убедиться, что оно находится в выключенном состоянии.
4. По завершении работы не забудьте отключить печь и прибор от сети.

**ЗАПРЕЩАЕТСЯ** прикасаться к крышке тигля после включения нагрева и до остывания образца.

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Включите питание стенда нажатием на кнопку «Сеть».
2. Включите печь нажатием на кнопку «Нагрев» и одновременно запустите секундомер. Через равные промежутки времени (20 секунд) снимайте показания прибора (измеряйте температуру олова).
3. Измерения проводите до тех пор, пока температура не достигнет постоянной величины  $T_{пл}$ . Зафиксируйте на измерителе-регуляторе стабилизацию температуры (начало плавления оловянного сплава).
4. Запишите время от начала стабилизации температуры до повышения температуры до  $220^{\circ}\text{C}$ .
5. Результаты измерений занесите в таблицу (Количество строк будет соответствовать количеству измерений).
6. Выключите печь при достижении температуры нагрева примерно  $220^{\circ}\text{C}$  нажатием на кнопку «Нагрев».
7. Включите кнопку «Охлаждение» и продолжите фиксировать температуру образца до кристаллизации.
8. Проведите аналогичные измерения при охлаждении олова (Так как охлаждение протекает медленнее, то проводите измерения с интервалом примерно 40 с).
9. Результаты также занесите в таблицу.
10. Выключите установку нажатием на кнопку «Сеть».

Таблица

№	$t, \text{c}$	$T_{\text{нагр}}, \text{K}$	$t, \text{c}$	$T_{\text{охл}}, \text{K}$	$T_{\text{пл}}, \text{K}$	$\Delta S_{\text{нагр}}, \text{Дж/К}$	$\Delta S_{\text{пл}}, \text{Дж/К}$	$\Delta S, \text{Дж/К}$
1								
2								
3								
4								
5								

...								
-----	--	--	--	--	--	--	--	--

11. Постройте графики зависимости  $T = f(t)$  при нагревании и охлаждении.
12. Определите значение температуры, соответствующее участку графиков, параллельных оси времени, и по их среднему значению найдите температуру плавления олова.
13. Определите по формуле (3) изменение энтропии во время нагревания и плавления олова. Удельная теплота плавления и удельная теплоемкость олова, соответственно, равны 59,6 кДж/кг и 0,218 кДж/(кг·К), массу олова считать равной 1 кг.
14. Оцените погрешность результатов измерений по формуле

$$\frac{\Delta(\Delta S)}{\Delta S} = \sqrt{\left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T_{\text{пл}}}\right)^2}.$$

15. Сделайте вывод.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** По указанию преподавателя можно рассчитать изменение энтропии при кристаллизации и охлаждении олова.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятия фазового перехода первого рода.
2. Охарактеризуйте понятие энтропии и укажите единицы СИ ее измерения.
3. Объясните, чему равно изменение энтропии при изотермическом и адиабатическом процессах.
4. Выведите основную расчетную формулу, используемую в данной работе.
5. Объясните суть метода определения изменения энтропии при нагревании и плавлении олова.
6. Ответьте, до какой температуры нужно нагревать олово в тигле при выполнении эксперимента.
7. Укажите основные источники погрешностей данного метода измерений.
8. Представьте цикл Карно в координатах  $S — T$ .
9. Как определяется макро- и микросостояние системы?
10. Что такое статический вес?
11. Что такое энтропия? Какие определения этой величины Вы знаете? В чем их различие?
12. Какие Вы знаете функции состояния системы?
13. Что такое свободная энергия системы?



14. Сформулируйте второе начало термодинамики. Почему его относят к законам сохранения?
15. Как изменяется величина энтропии в обратимых и необратимых процессах?
16. Объясните статистический и термодинамический смысл энтропии.
17. Что такое приведенная теплота и как она определяется, если в процессе передачи тепла температура нагревателя изменяется?
18. Что такое обратимые и необратимые процессы?

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кикоин, А.К. Общий курс физики: учеб. пособие для студентов вузов/ А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – § 35, 36, 48, 49.
2. Матвеев, А.Н. Молекулярная физика: учеб. пособие для студентов вузов/А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1981. – § 51, 52.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т./Д.В. Сивухин. –М.: Физматлит, МФТИ, 2002. – §86, 89.
4. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2003. – § 46, 48.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика. Молекулярная физика: учеб. пособие для студентов втузов. – 2-е изд., перераб. /И.В. Савельев. – М.: Наука, 1999. – § 111, 112.

### ГЛОССАРИЙ

1. **Кулер** — система охлаждения воздуха, подаваемого в двигатель.
2. **Приведенное количество теплоты** – элементарное количество теплоты  $\delta Q$ , полученное термодинамической системой в бесконечно малом процессе, при абсолютной температуре  $T$ .
3. **Тигель** – сосуд из огнеупорного материала для плавки металлов или для прокаливания чего-либо на сильном огне.
4. **Фазовый переход первого рода** – это фазовые переходы, при которых скачком изменяются первые производные термодинамических потенциалов по интенсивным параметрам системы (температуре или давлению).
5. **Энтропия** – **термодинамическая энтропия**  $S$ , часто именуемая просто энтропией, – физическая величина, используемая для описания термодинамической системы. Энтропия является функцией состояния.

Учебное издание

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ И ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
1-36 по курсу «Физика 1» для студентов всех направлений и  
специальностей

*Составители*

МЕЛЬНИКОВА Тамара Николаевна

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 20.09.2022. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.  
Заказ . Тираж 50?? экз.

---

Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет


Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO  
9001:2008



---

**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru