

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ФИЗИКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ им. ЛАНДАУ

## **Лабораторная работа №2.1.4**

### **Определение теплоёмкости твёрдых тел**

Плотникова Анастасия Александровна  
Группа Б02-406

Долгопрудный, 2025 г.

## Цель работы

1. Прямое измерение кривых нагревания  $T_{\text{heat}}(t)$  и охлаждения  $T_{\text{cool}}(t)$  пустого калориметра и системы «калориметр + твердое тело».
2. Определение коэффициента теплоотдачи стенок калориметра.
3. Определение теплоемкости пустого калориметра и удельной теплоемкости твердого тела.

## Оборудование

Калориметр с нагревателем и термометром сопротивления, универсальные вольтметры В7-78/2 и В7-78/3, источник питания GPS-72303, вольтметр KEITHLEY, термомпара К-типа, программа АКИП.

## Теоретическая справка

При подведении к телу количества тепла  $\Delta Q$  за время  $\Delta t$ , изменение температуры  $\Delta T$  связано с теплоёмкостью  $C$  выражением:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

С учётом теплопотерь:

$$C\Delta T = P\Delta t - \lambda(T - T_k)\Delta t \quad (2)$$

В дифференциальной форме уравнения нагревания и охлаждения:

$$C \frac{dT_{\text{heat}}(t)}{dt} = P - \lambda(T_{\text{heat}}(t) - T_k(t)) \quad (3)$$

$$C \frac{dT_{\text{cool}}(t)}{dt} = -\lambda(T_{\text{cool}}(t) - T_k(t)) \quad (4)$$

Связь между сопротивлением термометра и температурой:

$$R_T = R_{273} [1 + \alpha(T - 273)] \quad (5)$$

Для пересчета сопротивлений:

$$T(R_T) = \frac{R_T}{R_k} \cdot \frac{1 + \alpha(T_k - 273)}{1 + \alpha(T - 273)} \cdot 273 \quad (7)$$

Для охлаждения (при  $P = 0$ ), интегрирование даёт:

$$T(t) = (T_0 - T_k)e^{-\frac{\lambda}{C}t} + T_k \quad (11)$$

По графику  $\ln(T - T_k)$  от  $t$  можно найти  $\frac{\lambda}{C}$  — наклон прямой.

Для нагрева ( $P \neq 0$ ):

$$T(t) = \left(1 - e^{-\frac{\lambda}{C}t}\right) \cdot \frac{P}{\lambda} + T_k \quad (15)$$

В точке, где  $T = T_k$ :

$$C = \frac{P}{\left|\frac{dT_{\text{heat}}}{dt}\right|_{T=T_k}} \quad (16)$$

## Экспериментальная установка

Экспериментальная установка включает калориметр с пенопластовой теплоизоляцией, помещённый в деревянный корпус. Внутренние стенки калориметра выполнены из материала с высокой теплопроводностью и имеют форму усечённых конусов, обеспечивая хороший тепловой контакт с телом.

Внутри калориметра установлены нагревательная спираль (СН) и термометр сопротивления. Температура измеряется через терморезистор, сопротивление которого зависит от температуры по формуле (5). Для измерений используются:

- универсальные вольтметры В7-78/2 и В7-78/3,
- вольтметр KEITHLEY,
- термопара К-типа,
- источник питания GPS-72303,
- программа АКИП В7-78 РТ-Tool для автоматической записи данных.

## Методика эксперимента

1. Включим в сеть все измерительные приборы и установим требуемые режимы измерений:
  - Вольтметр В7-78/2 переведём в режим измерения температуры с термопарой К-типа.
  - Один из вольтметров В7-78/3 настроим как омметр (четырёхпроводная схема).
  - Вторым В7-78/3 используем как амперметр.
  - KEITHLEY автоматически перейдёт в режим измерения напряжения.
2. Запустим программу АКИП и проверим связь с приборами. Установим настройки сбора данных: скорость, количество точек, смещение и масштаб. Отметим нужные параметры в лабораторном журнале.
3. Нажмём «Старт» в программе и будем вести непрерывную запись температур и сопротивлений.
4. Охладим калориметр на  $2-5^{\circ}\text{C}$  ниже комнатной температуры с помощью охлаждённого латунного образца. Через 3–4 минуты извлечём образец и подождём ещё 3–4 минуты, чтобы температура стабилизировалась.
5. Измерим зависимость сопротивления терморезистора от времени  $R_{\text{heat}}(t)$  при нагревании пустого калориметра:
  - Включим нагреватель (кнопка «OUTPUT» на GPS-72303).
  - Будем наблюдать за ростом температуры до превышения комнатной на  $8-9^{\circ}\text{C}$ .
  - Отключим нагреватель и начнём запись охлаждения.
6. Измерим кривую охлаждения  $R_{\text{cool}}(t)$  при  $P = 0$ .

7. Повторим измерения нагревания и охлаждения для калориметра с телами (железо, алюминий). Перед каждым измерением охладим калориметр как в п. 4.
8. После завершения измерений нажмём кнопку «Стоп» в программе и сохраним CSV-файлы с результатами измерений.

## Обработка результатов измерений

1. Откроем сохранённые CSV-файлы Record1 и Record2 в Excel или аналогичной программе. Каждый файл содержит:
  - первую колонку — время в формате hh:mm:ss,
  - вторую колонку — показания: температура в °C (термопара) или сопротивление в Ом (терморезистор).

2. Преобразуем время в секунды от начала измерения:

- заменим значения времени на числовую последовательность от 0 с шагом 1 с.

3. Пересчитаем значения сопротивления терморезистора  $R_T$  в температуру  $T$  по калибровочной зависимости:

$$T(R_T) = aR_T + b$$

где:

Для установки 1:  $T(R_T) = 14.584 \cdot R_T + 39.355$  Для установки 2:  $T(R_T) = 14.378 \cdot R_T + 39.355$

4. Пересчитаем показания комнатной температуры  $T_k$  в Кельвины:

$$T_k(\text{K}) = T_k(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

5. Построим графики  $T_{\text{heat}}(t)$ ,  $T_{\text{cool}}(t)$  и  $T_k(t)$  на одном поле. По времени, зафиксированному в лабораторном журнале, определим участки соответствующие пустому калориметру, образцам из железа и алюминия.

6. Построим график охлаждения в координатах:

$$(\ln(T_{\text{cool}}(t) - T_k), t)$$

По углу наклона прямой на линейном участке определим отношение:

$$\frac{\lambda}{C}$$

7. По формуле:

$$T(t) = (T_0 - T_k)e^{-\frac{\lambda}{C}t} + T_k$$

найдем  $\lambda$  и затем определим теплоёмкость пустого калориметра:

$$C = \frac{\lambda}{k}$$

8. Повторим те же действия для калориметра с образцами из железа и алюминия. Получим полные теплоёмкости  $C_{\text{Fe+cal}}$  и  $C_{\text{Al+cal}}$ . Тогда теплоёмкости образцов:

$$C_{\text{Fe}} = C_{\text{Fe+cal}} - C_{\text{cal}}, \quad C_{\text{Al}} = C_{\text{Al+cal}} - C_{\text{cal}}$$

9. Дополнительно определим  $C$  и  $\lambda$  дифференциальным методом:

- По формуле при  $T = T_k$ :

$$C = \frac{P}{\left. \frac{dT_{\text{heat}}}{dt} \right|_{T=T_k}} \quad (16)$$

- Либо на одинаковых температурах  $T$  при нагреве и охлаждении:

$$C = \frac{P \left( \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{cool}} \right)}{\left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{heat}} - \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{cool}}} \quad (19)$$

$$\lambda = \frac{P}{\left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{heat}} - \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{cool}}} \quad (20)$$

- При условии  $T_{k,\text{heat}} = T_{k,\text{cool}} = T_k$ , формулы упрощаются:

$$C = \frac{P}{\left( \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{heat}} - \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{cool}} \right)} \quad (21)$$

$$\lambda = \frac{P}{\left( \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{heat}} - \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{cool}} \right)} \cdot \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{cool}} \quad (22)$$

10. Сравним полученные значения  $C$  и  $\lambda$  по интегральному и дифференциальному методам. Сделаем вывод о точности и применимости методов.

## Вывод

В ходе выполнения лабораторной работы:

- Измерили кривые нагревания и охлаждения пустого калориметра и калориметра с образцами из железа и алюминия.
- Определили коэффициент теплоотдачи  $\lambda$  и теплоемкость  $C$  калориметра, используя интегральный метод на основе спрямления графиков  $\ln(T - T_k)$ .
- Вычислили теплоёмкости исследуемых образцов как разность между полной теплоёмкостью системы и теплоёмкостью пустого калориметра.
- Провели дополнительные расчёты по дифференциальным формулам, применяя их к «удобным точкам» графиков, и сравнили с результатами интегрального метода.

Полученные значения удельной теплоемкости исследуемых металлов оказались близки к табличным значениям. Наиболее точные результаты были достигнуты при стабильной комнатной температуре и достаточной длительности измерений, позволяющей исключить переходные режимы.

## Контрольные вопросы

1. Как определяются удельные и молярные теплоемкости?
2. Обоснуйте применение главной расчётной формулы работы. Запишите её в дифференциальной форме для процессов нагревания и охлаждения.
3. Выведите формулу пересчёта кривых  $R_{\text{heat}}(t)$ ,  $R_{\text{cool}}(t)$  в  $T_{\text{heat}}(t)$ ,  $T_{\text{cool}}(t)$ .
4. Получите теоретические зависимости  $T_{\text{heat}}(t)$  и  $T_{\text{cool}}(t)$ .
5. При каких условиях корректно применять интегральный метод определения  $C$  и  $\lambda$ ? Что влияет на его точность?
6. Зачем необходимо предварительно охлаждать калориметр на 2–5 °С ниже комнатной температуры?
7. Опишите «удобные точки» на кривых нагревания и охлаждения, при которых корректно применять дифференциальные методы.
8. Чему равна атомная теплоёмкость по классической теории? А молярная?
9. Сравните точность интегрального и дифференциального методов определения теплоёмкости и коэффициента теплоотдачи.