

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 ($T_{heat}(t)$) и охлаждения ($T_{cool}(t)$) пустого калориметра и системы «калориметр + твердое тело»;
- 2) определение коэффициента теплоотдачи стенок калориметра;
- 3) определение теплоемкости пустого калориметра и удельной теплоемкости твердого тела.

В работе используются:

калориметр с нагревателем и термометром сопротивления;
универсальный вольтметр В7-78/3 в режиме омметра,
измеритель температуры:
— термопара К-типа,
— универсальный вольтметр В7-78/2,
источник питания GPS-72303,
универсальные вольтметры В7-78/3 (в режиме амперметра),
KEITHLEY (в режиме вольтметра) для измерения мощности нагревателя,
компьютерная программа АКИП для сопряжения персонального компьютера и универсальных вольтметров В7-78/2 и В7-78/3.

Теоретическая справка

При подведении к телу количества тепла ΔQ за время Δt , изменение температуры ΔT связано с теплоёмкостью C выражением:

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

С учётом теплопотерь:

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

В дифференциальной форме уравнения нагревания и охлаждения:

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

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

Связь между сопротивлением термометра и температурой:

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

Для пересчёта сопротивлений, измеренных при комнатной температуре T_k , используется выражение:

$$R_{273} = \frac{R_k}{1 + \alpha(T_k - 273)}$$

Тогда, подставив, получим:

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

В эксперименте используется температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha = 4.28 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

При охлаждении калориметра ($P = 0$) уравнение принимает вид:

$$C \frac{dT}{dt} = -\lambda(T - T_k)$$

Интегрируя от начального момента $t = 0$ до t , получим:

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

Из графика зависимости $\ln(T - T_k)$ от t можно найти наклон, равный $-\lambda/C$.
При нагревании калориметра ($P \neq 0$):

$$C \frac{dT}{dt} = P - \lambda(T - T_k)$$

Интегрирование даёт:

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

В «удобной точке», когда $T = T_k$, получаем простую формулу для определения теплоемкости:

$$C = \frac{P}{\left(\frac{dT}{dt}\right)_{T=T_k}}$$

Также можно использовать значения производных при одной и той же температуре T на кривых нагревания и охлаждения. Тогда:

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

Если T_k одинаково для обеих кривых, формулы упрощаются:

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

Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рисунке (1).

Установка включает калориметр с пенопластовой изоляцией, размещенный в ящике из многослойной фанеры.

Внутренние стенки калориметра выполнены из материала с высокой теплопроводностью, с усеченными конусами для обеспечения плотного контакта.

Выталкивание образца происходит через винт в доньшке. В стенку калориметра вмонтированы спираль нагревателя и терморезистор.

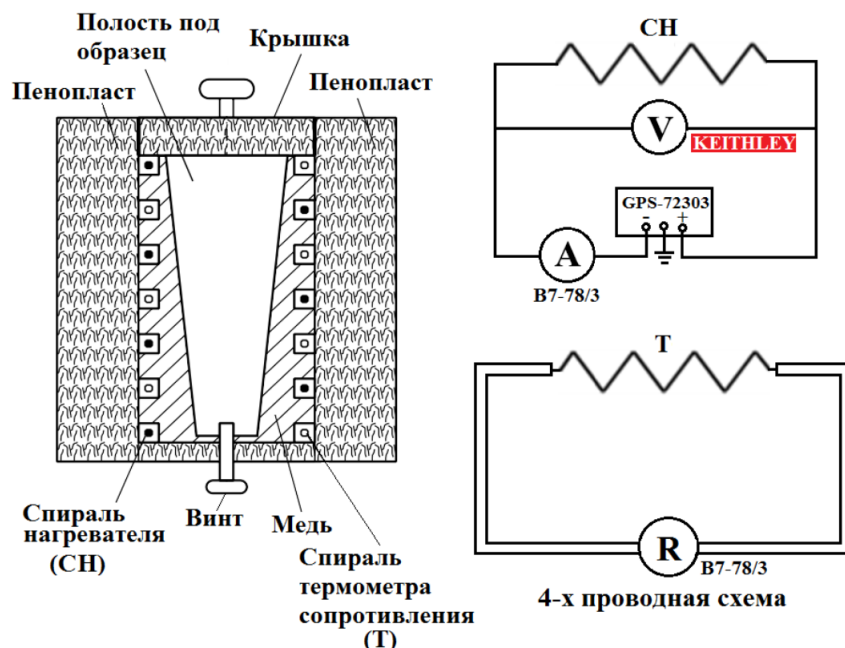


Рис. 1: Схема установки

Ход работы

I. Подготовка к эксперименту

1. Включим в сеть измерительные приборы: источник питания GPS-72303 (кнопка «POWER», кнопку «OUTPUT» не будем включать!), два универсальных вольтметра В7-78/3 (кнопка «Сеть»), универсальный вольтметр В7-78/2 (кнопка «Сеть»), универсальный вольтметр KEITHLEY (кнопка «POWER»). Установим требуемые режимы работы мультиметров. Универсальный вольтметр В7-78/2 переведем в режим измерения температуры с помощью термопары К-типа (последовательное нажатие кнопок «преф» и «темп»). Универсальный вольтметр В7-78/3 (1) переведем в режим измерения сопротивления по четырёхточечной схеме (последовательное нажатие кнопок «преф» и « $\Omega 2$ »), ещё один универсальный вольтметр В7-78/3 (2) переведем в режим измерения постоянного тока (последовательное нажатие кнопок «преф» и «U=»). Убедимся, что универсальный вольтметр KEITHLEY при включении автоматически перейдёт в режим измерения постоянного напряжения (V DC).
2. Включим компьютер (ноутбук MSI). Убедимся в том, что он не подключён к интернету и запустим с рабочего стола программу АКИП В7-78 PT-Tool.
3. Убедимся, что программа видит универсальные вольтметры В7-78/2 и В7-78/3, предназначенные соответственно для измерения временной зависимости комнатной температуры (термопара К-типа) в градусах $^{\circ}\text{C}$ и сопротивления спирали термометра (T) в Омах.
4. Из меню «Настройки» выберем пункт «Настройки устройства». Для каждого прибора из списка устройств выберем необходимый режим, путём нажатия соответствующих кнопок подтвердим и загрузим настройки вольтметров. Нажмём «Выход».

5. Из меню «Настройки» выберем пункт «Настройки Режима». Отметим режим сбора «Несколько устройств». В разделе «параметры» для каждого из вольтметров выберем необходимый «цвет графика» и номер файла записи (например, Record1 и Record2). Поставим галочку «Сохранить» и нажмём ОК.
6. В главном окне программы выберем «разряд» (цену деления измеряемой величины по оси ординат) и «смещение» графика в целых единицах измеряемой величины относительно горизонтальных курсоров 1 и 2 (каждому курсору соответствует свой прибор). Курсоры 1 и 2 вместе с соответствующими графиками переместим кнопками «Up» и «Dn». Затем выберем «скорость» записи (временной шаг) и «точки» (количество точек по оси времени).
7. Подготовим лабораторный журнал для фиксации ключевых действий и времени (по часам ноутбука). Будем записывать только важные события, чтобы потом соотнести их с графиками.
8. Нажмём кнопку «Старт» в верхнем левом углу программы и не будем выключать её до завершения работы. Через 40 секунд на графике появятся кривые температуры (красная) и сопротивления (синяя). Ось времени направлена справа налево. Будем использовать графики для контроля хода эксперимента. Цифровые значения извлечём позже из CSV-файлов.

II. Проведение измерений

1. Охладим калориметр до температуры на 2–5 °C ниже комнатной. Температуру калориметра проконтролируем по калибровочной кривой $T(R)$ терморезистора (график рядом с установкой). Для этого вставим в калориметр охлаждённый латунный конус. Через 3–4 минуты, после того как температура в калориметре начнёт медленно расти, извлечём конус и вернём его в ёмкость с охлаждённой водой. Подождём ещё 3–4 минуты.
2. При неизменной мощности нагревателя определим зависимость сопротивления терморезистора $R_{\text{heat}}(t)$ от времени для пустого калориметра. Для этого замкнём цепь спирали нагревателя СН (нажмём кнопку «OUTPUT» на источнике GPS-72303, должна загореться зелёная лампочка). Будем следить за ростом температуры калориметра. Как только она превысит комнатную на 8–9 °C (через 25–30 минут), отключим нагреватель (повторно нажмём кнопку «OUTPUT», зелёная лампочка погаснет).
3. Определим зависимость $R_{\text{cool}}(t)$ при охлаждении пустого калориметра. Будем продолжать наблюдение до снижения температуры на 1–2 °C по сравнению с моментом отключения нагревателя.
4. Снова охладим калориметр до температуры на 2–5 °C ниже комнатной, используя латунный образец (как в п. 1). Вставим исследуемое тело в калориметр и повторим измерения $R_{\text{heat}}(t)$ и $R_{\text{cool}}(t)$, как в пп. 2–3.
5. Проведём измерения для двух образцов — из железа и алюминия.
6. По завершении всех измерений нажмём кнопку «Стоп» в программе АКИП. В меню «Регистратор» выберем пункт «Просмотр Записи». Сохраним файлы Record1 и Record2 в папку «Лаба 214» на рабочем столе и на флешку. Присвоим файлам узнаваемые имена.

III. Обработка результатов измерений

1. Откроем CSV-файлы Record1 и Record2 в программе Excel. Каждый файл содержит две колонки: первая — время в формате чч:мм:сс, вторая — показания: в °C (термопара) или в Ом (терморезистор).
2. Разделим данные по столбцам: выделим первую колонку, затем выберем «Данные» → «Текст по столбцам» → «С разделителями» → выберем «Запятая» → «Готово».
3. Преобразуем формат времени в секунды: удалим заголовки, очистим первую колонку, зададим первый элемент как 0, второй — как 1. Выделим оба, протянем вниз до конца таблицы, чтобы получить последовательность времени $t = 0, 1, 2, \dots$
4. Пересчитаем значения сопротивления терморезистора R_T в температуру $T(R_T)$ по калибровочной формуле:

$$T(R_T) = 14.584 \cdot R_T + 39.355 \quad (\text{установка 1})$$

$$T(R_T) = 14.378 \cdot R_T + 39.355 \quad (\text{установка 2})$$

5. Пересчитаем температуру окружающей среды T_k из градусов Цельсия в Кельвина по формуле:

$$T_k[\text{K}] = T_k[^\circ\text{C}] + 273.15$$

6. Построим графики $T_{\text{heat}}(t)$, $T_{\text{cool}}(t)$ и $T_k(t)$. Сопоставим участки с лабораторными записями и определим кривые для пустого калориметра и с образцами.
7. Построим график зависимости:

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

Исключим начальный нелинейный участок. На линейном участке определим тангенс наклона — это λ/C .

8. Используя выражение:

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

и найденное ранее отношение λ/C , определим коэффициент теплоотдачи λ , затем теплоёмкость C пустого калориметра.

9. Повторим пункты 6–8 для образцов из железа и алюминия. Найдём полную теплоёмкость системы и определим теплоёмкость тел как:

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

10. Альтернативно определим C и λ дифференциальными методами:

- В точке $T = T_k$:

$$C = \frac{P}{\left. \frac{dT}{dt} \right|_{T=T_k}}$$

- В одинаковых точках T на кривых нагрева и охлаждения:

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

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

11. Сравним результаты, полученные интегральным и дифференциальным методами, с табличными значениями. Проанализируем точность и возможные источники погрешностей.

Вывод