

Лабораторная работа 2.1.4

Старостин Александр, Б01-401

19 Марта, 2025 год

1 Аннотация

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 ($\sigma_T = 0.05 \text{ K}$), измеритель температуры - термopа K-типа совместно с универсальным вольтметром В7-78/2 ($\sigma_{T_{комн}} = 0.1 \text{ K}$), источник питания GPS-72303, универсальные вольтметры В7-78/3 (в режиме амперметра) ($\sigma_I = 0.01 \text{ A}$) и KEITHLEY (в режиме вольтметра) ($\sigma_U = 0.1 \text{ В}$) для измерения мощности нагревателя, компьютерная программа АКИП для сопряжения персонального компьютера и универсальных вольтметров В7-78/2 и В7-78/3 ($\sigma_t = 0.01 \text{ с}$).

2 Теоретические сведения

В данной работе теплоемкость определяется по формуле

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad (1)$$

где ΔQ – количество тепла, подведенного к телу, и ΔT – изменение температуры тела, произошедшее в результате подвода тепла.

Температура внутри калориметра измеряется термометром сопротивления. В реальных условиях $\Delta Q \neq P\Delta t$, так как часть энергии уходит из калориметра благодаря теплопроводности его стенок. В результате количество тепла $\Delta Q = C\Delta T$, подведённое к системе "тело + калориметр" будет меньше на величину тепловых потерь:

$$C\Delta T = P\Delta t - \lambda(T - T_{\Delta T})$$

где λ - коэффициент теплоотдачи стенок калориметра, T - температура тела и калориметра, $T_{\Delta T}$ - комнатная температура.

Уравнение (2) является основной расчетной формулой работы. В дифференциальной форме для процессов нагревания и охлаждения ($P = 0$) соответственно оно имеет следующий вид:

$$CdT = Pdt - \lambda [T_{heat}(t) - T_{(t)}] dt \quad (3)$$

$$CdT = -\lambda [T_{cool}(t) - T_{(t)}] dt \quad (4)$$

где P – мощность нагревателя, λ – коэффициент теплоотдачи стенок калориметра, t – время, измеряемое от момента включения нагревателя, $T_{heat}(t)$ – температура тела в момент времени t на кривой нагревания, $T_{cool}(t)$ – температура тела в момент времени t на кривой охлаждения, $T_{(t)}$ – температура окружающего калориметр воздуха (комнатная) в момент времени t , dt – время, в течение которого температура тела изменилась на dT

3 Ход работы

3.1 Проведение измерений

3.1.1 Охлаждение калориметра

Вставляем в калориметр охлаждённый конус. Через 4 минуты после того, как температура в калориметре начинает медленно расти, вынимаем конус и ждём ещё 4 минуты. Калориметр охладился примерно на 5°C .

3.1.2 Определение зависимости сопротивления терморезистора от времени при нагревании пустого калориметра

Включаем нагреватель, после того, как температура в калориметре превысила комнатную на 9°C , отключаем цепь спирали нагревателя.

3.1.3 Определение зависимости сопротивления терморезистора от времени при охлаждении пустого калориметра

Продолжаем следить за изменением температуры калориметра. После того, как она уменьшилась на 2 градуса по сравнению с максимальной, приступаем к измерению теплоёмкости калориметра вместе с исследуемым телом.

3.1.4 Охлаждение калориметра

Снова охлаждаем калориметр до температуры на 5°C ниже комнатной. Вставляем в калориметр исследуемый образец и повторяем заново пункты 2-3.

3.1.5 Исследуемые образцы

Измерения проводим для образцов из алюминия и титана. Массы исследуемых образцов:

$$m_{\text{алюм}} = (286.9 \pm 0.5) \text{ г}$$

$$m_{\text{сталь}} = (812.8 \pm 0.5) \text{ г}$$

3.1.6 Окончание измерений

Останавливаем запись в программе. Сохраняем файлы с данным.

3.2 Обработка результатов измерений

3.2.1 Временные интервалы

Сопоставим процессы с временными отметками:

Событие	Начало, с	Конец, с
$T_{\text{heat}_1}(t)$ - нагрев пустого калориметра	780	2040
$T_{\text{cool}_1}(t)$ - охлаждение пустого калориметра	2040	2640
$T_{\text{heat}_2}(t)$ - нагрев алюминия	3840	5160
$T_{\text{cool}_2}(t)$ - охлаждение алюминия	5160	6240
$T_{\text{heat}_3}(t)$ - нагрев стали	7020	8580
$T_{\text{cool}_3}(t)$ - охлаждение стали	8580	8940

Таблица 1: Сопоставление кривых с отметками времени

Во время работы комнатная температура менялась менее чем на 2 K , значит мы можем использовать интегральный способ вычисления теплоёмкости

3.2.2 Теплоёмкость пустого калориметра

Построим график $(\ln \frac{T_{\text{cool}} - T_{\text{к}}}{T - T_{\text{к}}}, t)$, где $T_{\text{к}}$ - среднее значение комнатной температуры за время измерения; T - температура калориметра в начале кривой.

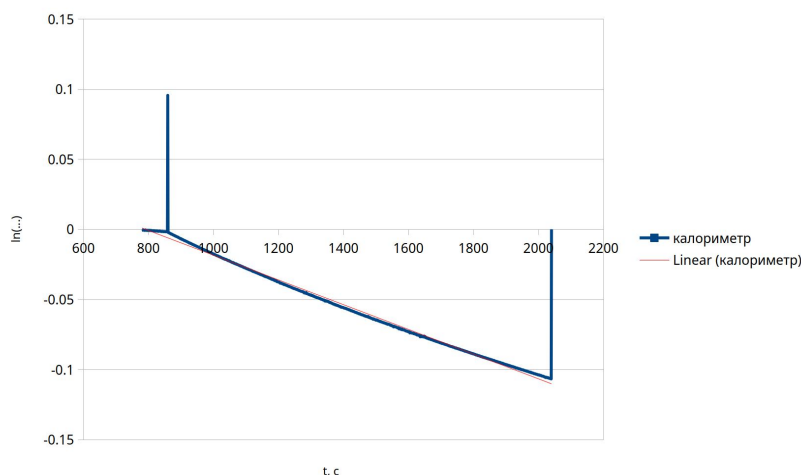


Рисунок 1: $T_{\text{cool}}(t)$ для пустого калориметра

По МНК найдём коэффициент наклона k . Причём:

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

$$\sigma_{\frac{\lambda}{C}} = \sqrt{\left(\frac{1}{t} \frac{\lambda}{C}\right)^2 \sigma_t^2 + \left(\frac{1}{t} \frac{1}{T_{cool}-T_k}\right)^2 \sigma_{T_{cool}}^2 + \left(\frac{1}{t} \frac{T_{cool}-T}{(T_{cool}-T_k)(T-T_k)}\right)^2 \sigma_{T_k}^2 + \left(\frac{1}{t} \frac{1}{T-T_k}\right)^2 \sigma_T^2},$$

Тогда: $\frac{\lambda}{C} = (88 \pm 25) * 10^{-1} \text{ c}^{-1}$.

Также $\lambda = \frac{1}{k}$,

$$\sigma_{\lambda}^{\text{приб}} = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{P}\right)^2 \sigma_P^2 + \left(\frac{P t e^{-\frac{\lambda}{C} t}}{T_{heat}-T_k}\right)^2 \sigma_{\frac{\lambda}{C}}^2 + \left(\frac{P \frac{\lambda}{C} e^{-\frac{\lambda}{C} t}}{T_{heat}-T_k}\right)^2 \sigma_t^2 + \left(\frac{\lambda}{T_{heat}-T_k}\right)^2 (\sigma_{T_{heat}}^2 + \sigma_{T_k}^2)},$$

$$\sigma_C^{\text{приб}} = C \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\frac{\lambda}{C}}}{\frac{\lambda}{C}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\lambda}}{\lambda}\right)^2}.$$

Итого результат с полной погрешностью:

$$\lambda = (0.11 \pm 0.02) \frac{\text{Дж}}{\text{К} * \text{с}},$$

$$C_{\text{калориметр}} = \lambda / \frac{\lambda}{C} = (0.79 \pm 0.07) \frac{\text{кДж}}{\text{К}}.$$

3.2.3 Теплоёмкость алюминия

Аналогично предыдущему пункту определяем теплоёмкость алюминиевого образца вместе с калориметром, затем вычитаем теплоёмкость калориметра.

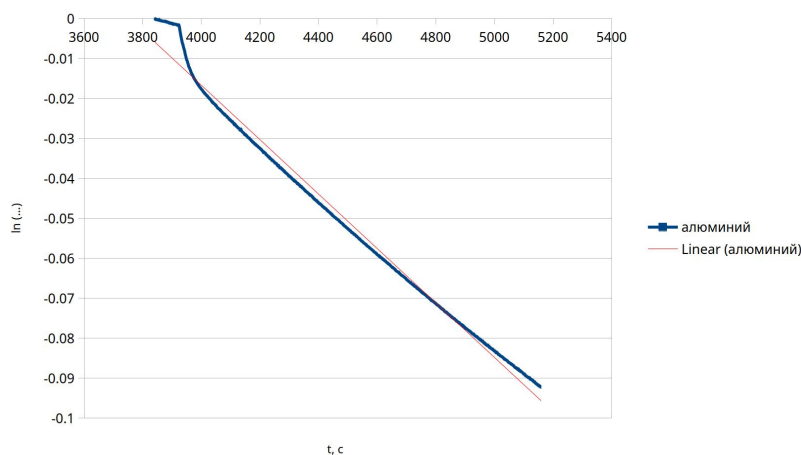


Рисунок 2: $T_{cool}(t)$ для калориметра с алюминиевым образцом

Получаем:

$$\frac{\lambda}{C} = (68 \pm 20) * 10^{-1} \text{ c}^{-1}$$

$$\lambda = (0.15 \pm 0.03) \frac{\text{Дж}}{\text{К} * \text{с}}$$

Тогда:

$$C = \lambda / \frac{\lambda}{C} = (1.0 \pm 0.2) \frac{\text{кДж}}{\text{К}}$$

И:

$$C_{\text{алюм}} = C - C_{\text{калориметр}} = (0.2 \pm 0.1) \frac{\text{кДж}}{\text{К}}$$

$$c_{\text{алюм}} = \frac{C_{\text{алюм}}}{m_{\text{алюм}}} = (0.8 \pm 0.6) \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

3.2.4 Теплоёмкость стали

Аналогично найдём все нужные значения для стали.

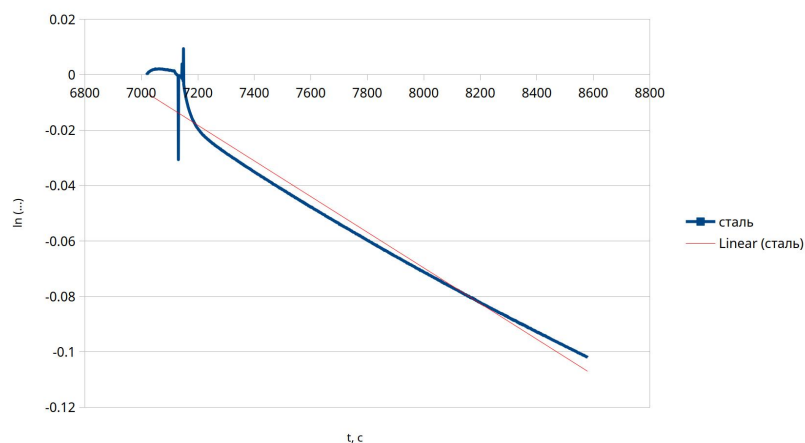


Рисунок 3: $T_{cool}(t)$ для калориметра с титановым образцом

Получаем:

$$\frac{\lambda}{C} = (64 \pm 16) * 10^{-5} \text{ c}^{-1},$$

$$\lambda = (0.16 \pm 0.04) \frac{\text{Дж}}{\text{К} * \text{с}}.$$

Тогда:

$$C = \lambda / \frac{\lambda}{C} = (0.103 \pm 0.245) \frac{\text{кДж}}{\text{К}}.$$

И:

$$C_{\text{сталь}} = C - C_{\text{калориметр}} = (0.23 \pm 0.11) \frac{\text{кДж}}{\text{К}},$$

$$c_{\text{сталь}} = \frac{C_{\text{сталь}}}{m_{\text{сталь}}} = (0.3 \pm 0.24) \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}.$$

4 Вывод

Мы измерили удельные теплоёмкости алюминия и стали; они совпадают с табличными значениями.

Табличные значения удельных теплоёмкостей для алюминия и стали:

$$c_{\text{алюм}} = 0.902 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}},$$

$$c_{\text{сталь}} = 0.462 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}.$$

Результаты совпадают с табличными значениями.

Большая погрешность всех результатов объясняется тем, что мы производим вычитание теплоёмкости калориметра из суммарной теплоёмкости калориметра и образца. Из-за того, что теплоёмкость калориметра в несколько раз больше, и получаются погрешности порядка самих величин.