

Московский физико-технический институт

**Лабораторная работа 2.1.4**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Отчёт студента группы Б02-303  
Долговой Екатерины

г.Долгопрудный, 2024

## Лабораторная работа 2.1.4

### Определение теплоёмкости твёрдых тел

**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 теплоёмкости пустого калориметра и удельной теплоёмкости твердого тела.

**В работе используются:** калориметр с нагревателем и термометром сопротивления; универсальный вольтметр В7-78/3 в режиме омметра, измеритель температуры - термопара К-типа совместно с универсальным вольтметром В7-78/2, источник питания GPS-72303, универсальные вольтметры В7-78/3 (в режиме амперметра) и 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.

### Теоретические сведения

В данной работе измерение теплоемкости твердых тел производится по стандартной схеме. Исследуемое тело помещается в калориметр с нагревателем мощностью  $P$ . Пусть  $\Delta Q$  — количество тепла, подведенное к системе «тело + калориметр» за время  $\Delta t$ , а  $\Delta T$  — изменение её температуры, произошедшее в результате подвода тепла  $\Delta Q$ . Тогда согласно определению теплоемкость системы «тело + калориметр» будет равна:

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

Температура внутри калориметра надежно измеряется термометром (в нашем случае — термометром сопротивления). В реальных условиях  $\Delta Q \neq P\Delta t$ , так как часть энергии, выделенной нагревателем, уходит из калориметра благодаря теплопроводности его стенок. В результате количества тепла  $\delta Q = C\Delta T$ , подведенное к системе «тело + калориметр» будет меньше  $P\Delta t$  на величину тепловых потерь:

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

где  $\lambda$  — коэффициент теплоотдачи стенок калориметра,  $T$  — температура тела и калориметра,  $T_k$  — температура окружающего калориметр воздуха (комнатная).

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

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

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

где  $P$  — мощность нагревателя,  $\lambda$  — 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,  $T_k(t)$  — температура окружающего калориметр воздуха (комнатная) в момент времени  $t$ ,  $dt$  — время, в течение которого температура тела изменилась на  $dT$ .

## Экспериментальная установка

Установка состоит из калориметра с пенопластовой изоляцией, помещенного в ящике из многослойной клееной фанеры. Внутренние стенки калориметра выполнены из материала с высокой теплопроводностью. Надежность теплового контакта между телом и стенками обеспечивается их формой: они имеют вид усеченных конусов и плотно прилегают друг к другу. Для выталкивания образца служит винт в доньшке внутренней стенки калориметра. В стенку калориметра вмонтированы спираль нагревателя (СН) и спираль термометра сопротивления (далее термометр или терморезистор). Экспериментально измеряемые данные:

1.  $R_{heat}(t)$  — кривая зависимости термометра сопротивления от времени при нагревании калориметра с телом при  $P = \text{const}$ .
2.  $R_{cool}(t)$  — кривая зависимости термометра сопротивления от времени при охлаждении калориметра с телом при  $P = 0$  (нагреватель выключен).
3.  $T_k(t)$  — кривая зависимости комнатной температуры от времени.

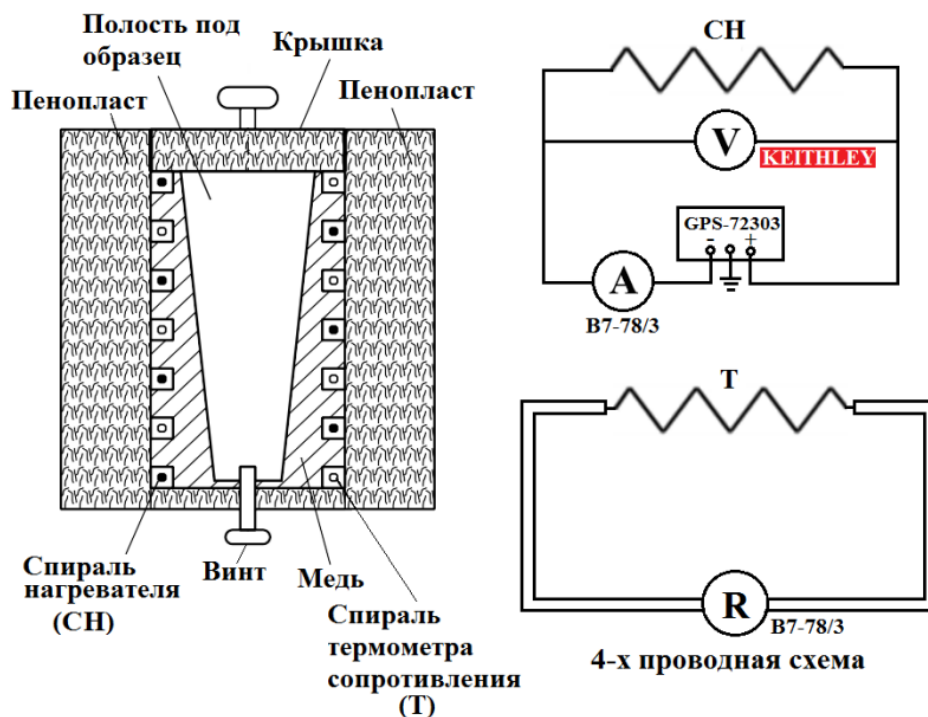


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Кривые  $R_{heat}(t)$ ,  $R_{cool}(t)$  и  $T_k(t)$  записываются по точкам с шагом по оси времени  $\Delta t = 1$  с при помощи компьютерной программы АКИП, напрямую (через USB-разъем) связанную с цифровыми вольтметрами В7-78/2 и В7-78/3, работающими соответственно в режиме измерения температуры (термопара К-типа) и омметра с подключением по 4-х проводной схеме.

## Методика эксперимента

Температура измеряется термометром сопротивления, который представляет собой медную проволоку, намотанную на теплопроводящий каркас внутренней стенки калори-

метра (рис. 1). Известно, что сопротивление проводника изменяется с температурой по закону:

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

где  $R$  — сопротивление термометра при  $T$  в К,  $R_{273}$  — его сопротивление при 273 К,  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Выразим сопротивление  $R_{273}$  через измеренное значение  $R_K$  — сопротивление термометра при комнатной температуре. Согласно (5), имеем:

$$R_{273} = \frac{R_K}{1 + \alpha(T_K - 273)}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), найдем:

$$T(R_T) = 273 + \frac{R_T}{\alpha R_K}[1 + (T_K - 273)] - \frac{1}{\alpha}. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет легко пересчитать кривые  $R_{heat}(t)$ ,  $R_{cool}(t)$  в кривые  $T_{heat}(t)$ ,  $T_{cool}(t)$ .

Из уравнения (4) при  $T_K(t) = T_K = const$ :

$$CdT_{cool} = -\lambda[T_{cool} - T_K]dt. \quad (8)$$

Это дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными  $T_{cool}$  и  $t$ . После интегрирования получим данную зависимость:

$$T_{cool}(t) = (T - T_K) \exp\left(-\frac{\lambda}{C}t\right) + T_K. \quad (9)$$

Уравнение (9) легко спрямляется в координатах  $\left(\frac{T_{cool}-T_K}{T-T_K}, t\right)$ . Тангенс угла наклона данной прямой позволяет определить отношение искомых величин  $\frac{\lambda}{C}$ .

Из уравнения (3) при  $T_K(t) = T_K = const$ :

$$CdT_{heat} = Pdt - \lambda[T_{heat} - T_K]dt, \quad (10)$$

Аналогично получаем зависимость

$$T_{heat}(t) = \frac{P}{\lambda} \left(1 - \exp\left(-\frac{\lambda}{C}t\right)\right) + T_K. \quad (11)$$

Уравнение (11) позволяет по найденному ранее из кривой охлаждения отношению  $\frac{\lambda}{C}$  определить  $\lambda$ , а зная  $\lambda$  и  $\frac{\lambda}{C}$  легко найти искомую теплоемкость.

При существенных (порядка 2-5 градусов) колебаниях комнатной температуры уравнения (9) и (11) будут выдавать большую ошибку в измерении  $\lambda$  и  $C$ , поэтому воспользуемся дифференциальными методами. Продифференцировав (3) по времени при  $T_{heat}(t) = T_K(t)$

$$C = \frac{P}{(dT_{heat}/dt)_{T=T_K}}. \quad (12)$$

Уравнение (12) будет верно в случае, если перед включением нагревателя необходимо охладить калориметр до температуры на  $\sim 2 - 5^\circ\text{C}$  ниже комнатной.

Также можно найти необходимые параметры с помощью точек с одинаковой температурой  $T$  на кривых  $T_{heat}(t)$  и  $T_{cool}(t)$ . Продифференцируем (3) и (4) по времени:

$$C \left( \frac{dT}{dt} \right)_{heat} = P - \lambda [T_{heat}(t) - T_k(t)]; \quad (13)$$

$$C \left( \frac{dT}{dt} \right)_{cool} = -\lambda [T_{cool}(t) - T_k(t)]. \quad (14)$$

Определим  $A = \left( \frac{dT}{dt} \right)_{heat}$  и  $B = \left( \frac{dT}{dt} \right)_{cool}$  при одной и той же температуре  $T$  на кривых  $T_{heat}(t)$  и  $T_{cool}(t)$  соответственно. Тогда с учетом введенных обозначений, решая систему уравнений (13) и (14), получим следующие выражения для  $C$  и  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{P}{(T - T_{k1})(1 - \frac{A}{B}) + T_{k2} - T_{k1}}; \quad (15)$$

$$C = \frac{P}{A - B + A \frac{T_{k1} - T_{k2}}{T - T_{k1}}}, \quad (16)$$

где  $T_{k1}$  и  $T_{k2}$  — комнатная температура в моменты времени  $t = t_1$  и  $t = t_2$ , когда  $T_{heat}(t_1) = T_{cool}(t_2) = T$ .

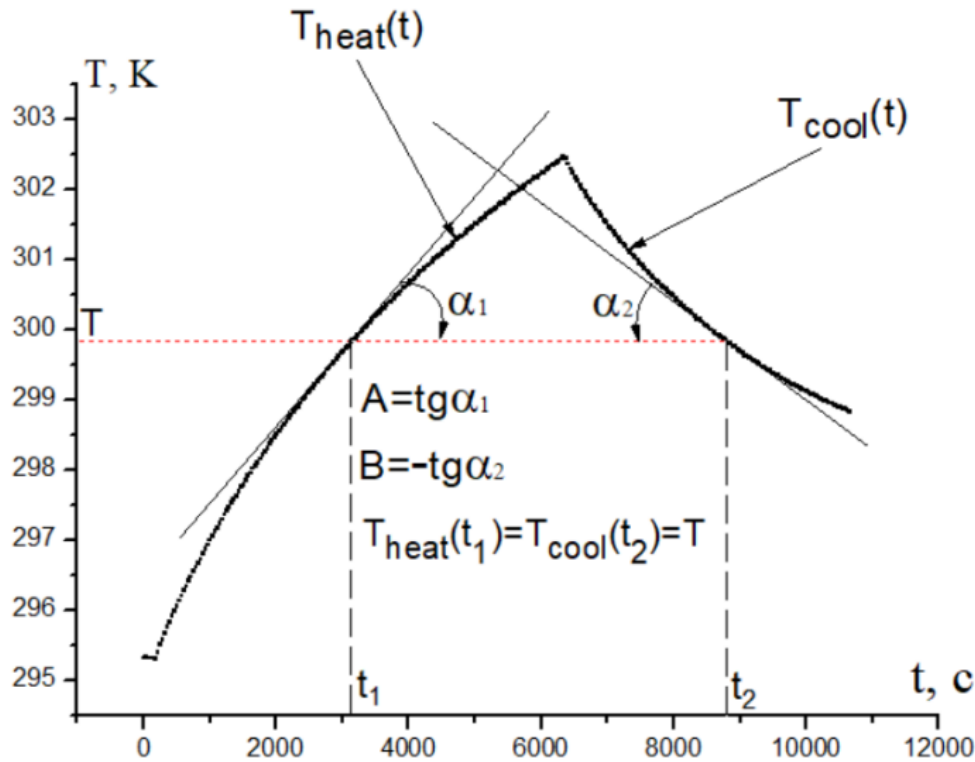


Рис. 2: Графики кривых  $T_{heat}(t)$  и  $T_{cool}(t)$

В случае равенства комнатных температур, когда  $T_{k1} = T_{k2} = T_k$  формулы (15) и (16) упрощаются:

$$\lambda = \frac{P}{(T - T_k)(1 - \frac{A}{B})}; \quad (17)$$

$$C = \frac{P}{A - B}. \quad (18)$$

Построим график при охлаждении в линейных координатах. При нахождении постоянной  $B$  будем учитывать кривую без начального участка (переходной области).

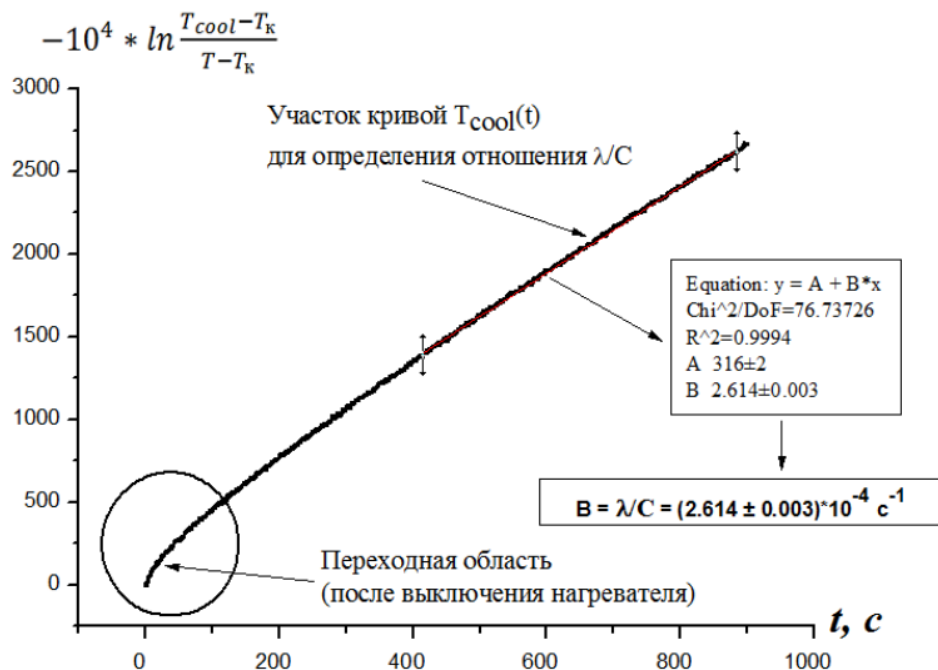


Рис. 3: Линеаризованные графики

## Ход работы

### Подготовка к эксперименту

1. Включим в сеть измерительные приборы: источник питания GPS-72303, два универсальных вольтметра В7-78/3, универсальный вольтметр В7-78/2, универсальный вольтметр KEITHLEY.
2. Включите компьютер и проверим программу на нем.
3. Настроим режимы видимости вольтметров.
4. Зададим параметры графиков.
5. Установим шкалу по осям графиков.
6. Подготовим лабораторный журнал для записи.
7. Нажмем кнопку «старт» и проверим, что данные отображаются на графике.

### Проведение эксперимента

8. С помощью латунного конуса охладим калориметр до температуры на  $\sim 2 - 5^\circ$  ниже комнатной.
9. При неизменной мощности нагревателя определим зависимость сопротивления терморезистора  $R(T)$  от времени  $R_{heat}(t)$  для пустого калориметра.
10. Определим зависимость сопротивления терморезистора  $R(T)$  от времени  $R_{cool}(t)$  при охлаждении пустого калориметра.
11. Повторим пп.9-10 заново.

12. Измерения проведем для двух образцов из железа и меди.
13. После окончания измерений нажмем кнопку «стоп» и сохраним CSV-файлы.

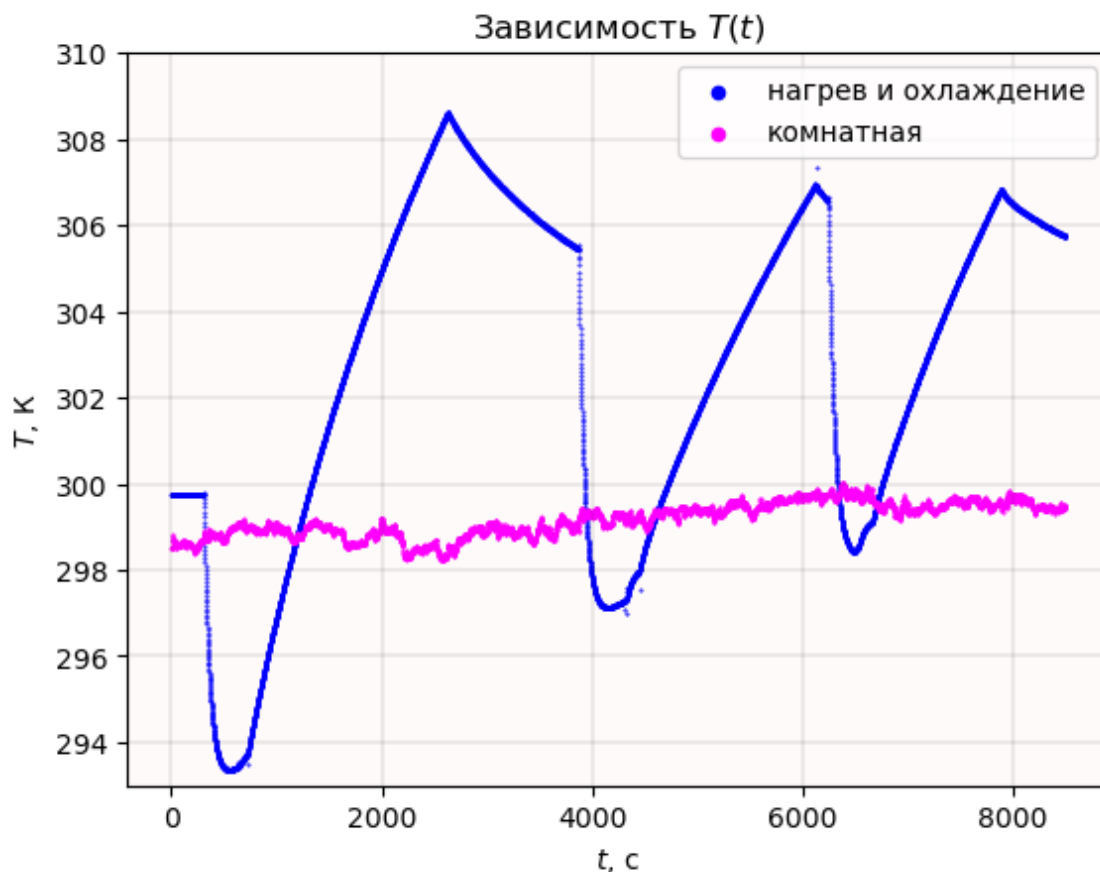
### Обработка результатов измерений

14. Откроем записанные CSV-файлы.
15. Пересчитаем значения второй колонки в файле с показаниями сопротивления терморезистора (вольтметр В7-78/3) из Ом в градусы согласно формуле (7).  
Для нашей установки №2:

$$T(R_T) = 14.377980252039598845 \cdot R_T + 39.35514018691588785$$

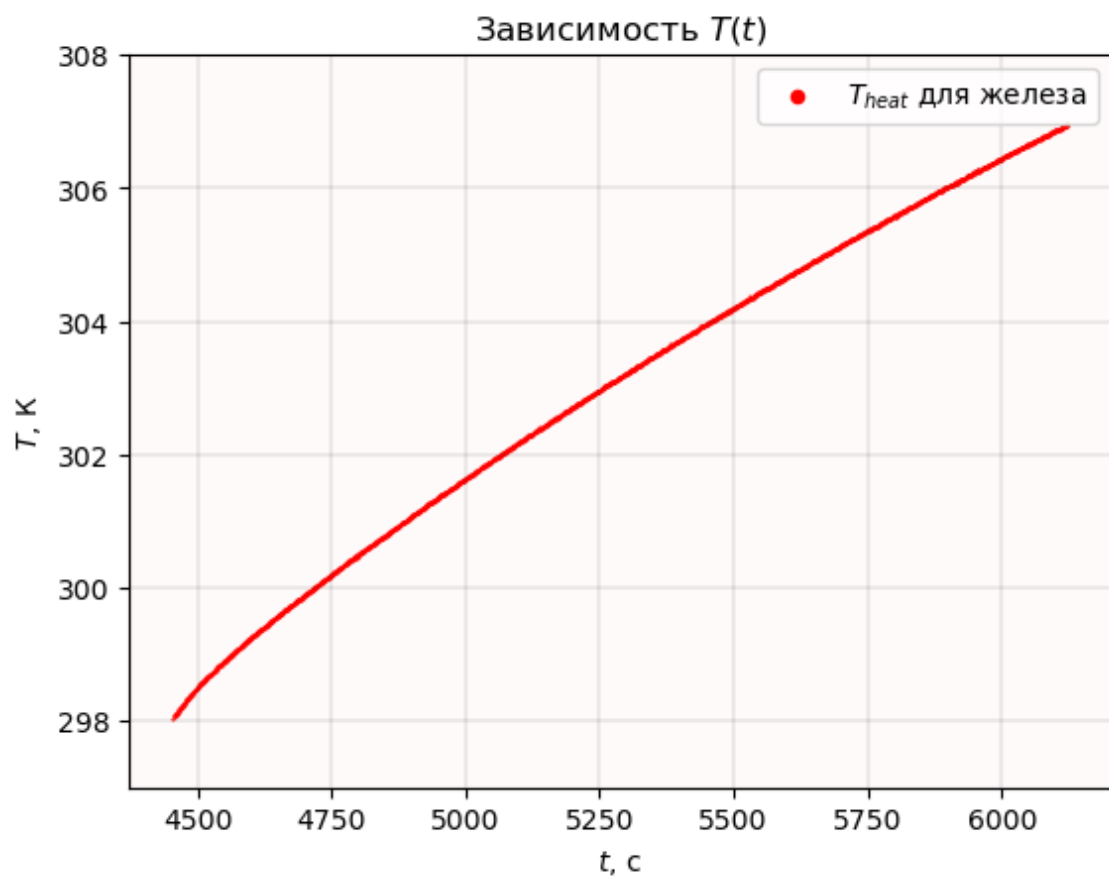
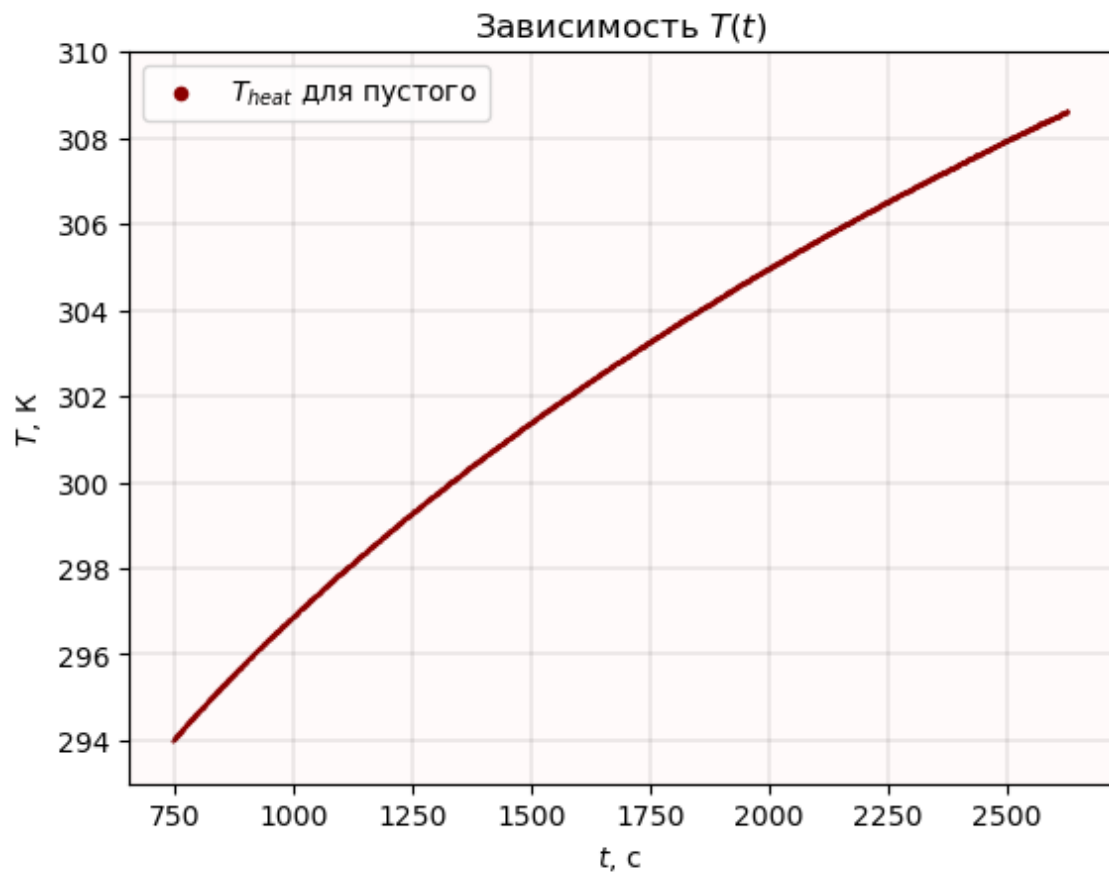
Пересчитаем значения второй колонки в файле с показаниями комнатной температуры (вольтметр В7-78/2) из ° в градусы К.

16. Построим кривые зависимостей  $T_{heat}$ ,  $T_{cool}(t)$ ,  $T_k(t)$  на одном графике.

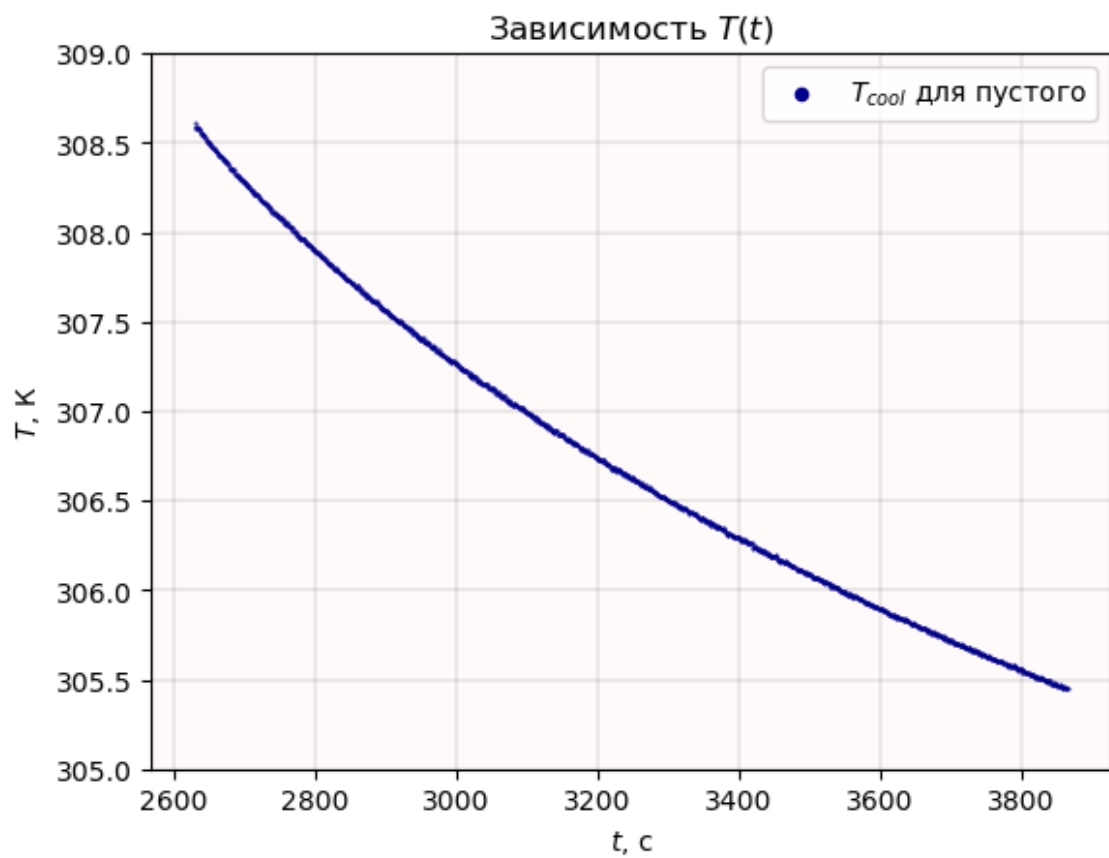
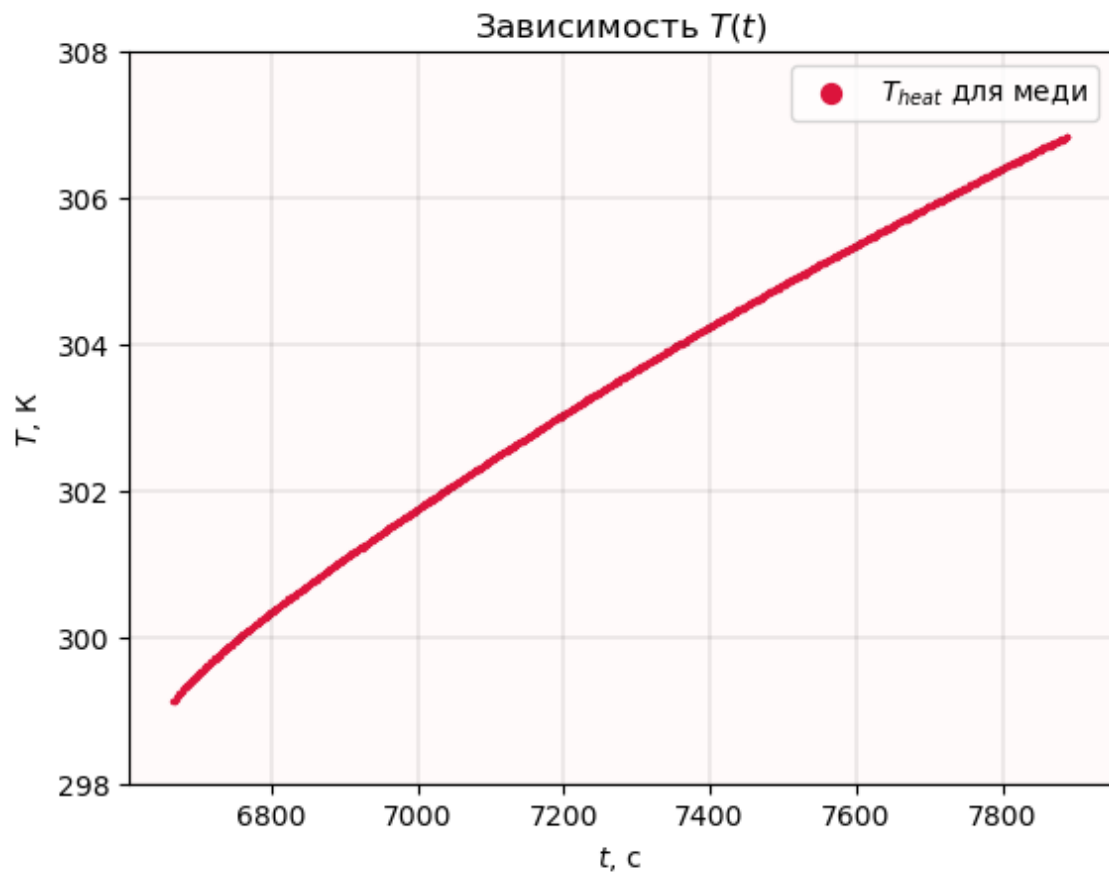


17. Построим кривую  $T_{cool}(t)$  для пустого калориметра в координатах  $\left(\frac{T_{cool}-T_k}{T-T_k}, t\right)$ , где  $T_k$  — среднее значение комнатной температуры за время измерения. Исключим из рассмотрения начальный нелинейный участок. На линейном участке кривой по тангенсу угла наклона определим отношение искомых величин  $\frac{\lambda}{C}$ .

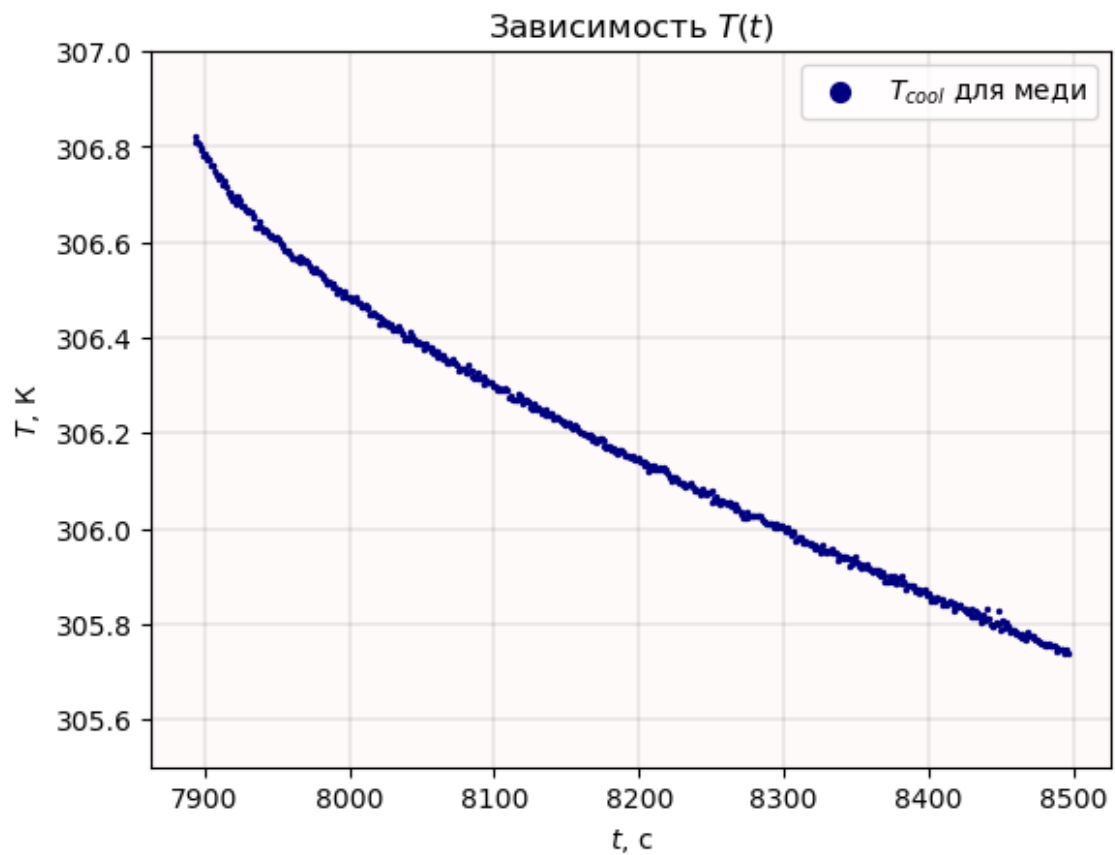
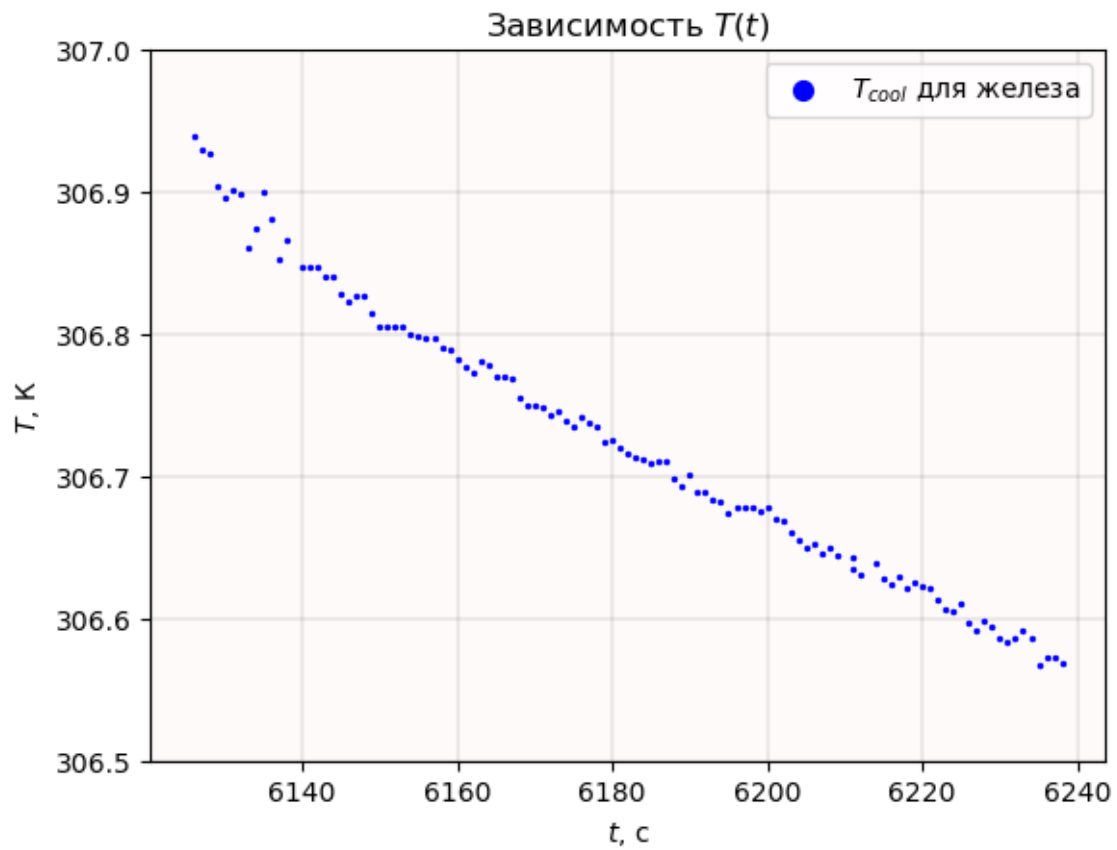
$$k_1 = \frac{\lambda}{C} = 0,0002817 \text{ с}^{-1}$$





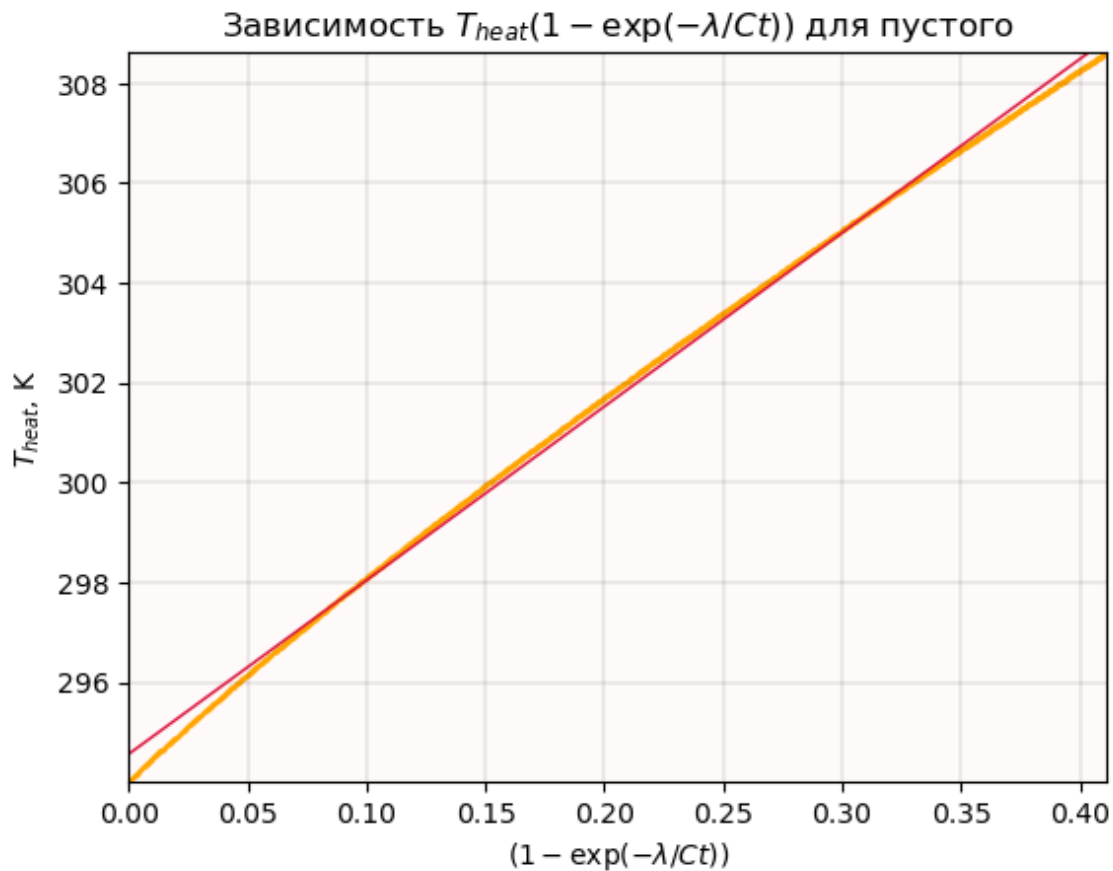


18. Из уравнения (11) определим  $\lambda$ . По найденным значениям  $\lambda$  и  $\frac{\lambda}{C}$  вычислим теплоемкость пустого калориметра.



Построим график зависимости  $T_{heat}(1 - \exp(-\frac{\lambda}{C}t))$ , откуда найдем отношение  $\frac{P}{\lambda}$ , где  $P$  определим параметрами измерительных приборов, указанных на них: напряже-

ние на вольтметре  $U = (27,2 \pm 0,3)$  В, ток на амперметре  $I = (0,226 \pm 0,003)$  А, следовательно,  $P = (6,15 \pm 0,11)$  Вт.



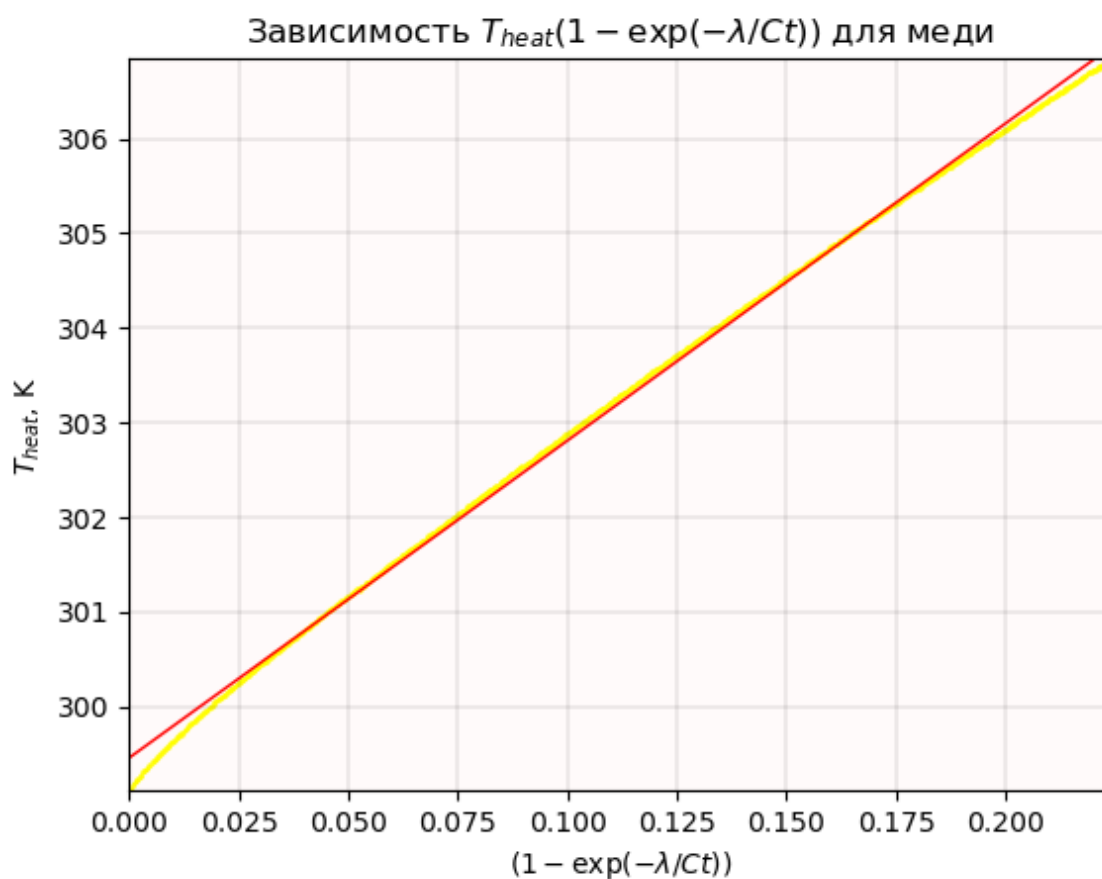
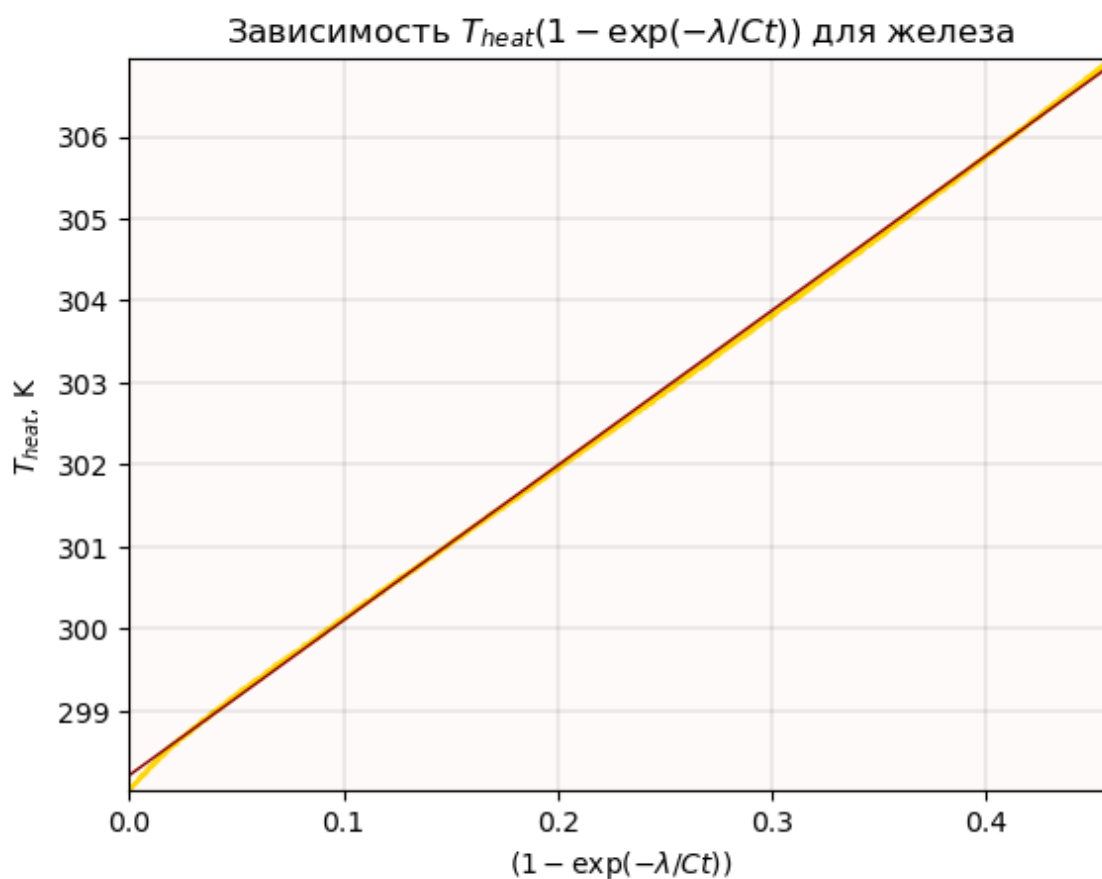
$$k_2 = \frac{P}{\lambda} = 34,82 \text{ K} \rightarrow \lambda = \frac{P}{k_2} = 0,177 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$$

$$C = \frac{\lambda}{k_1} = 628,3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

19. Повторим пункты (17) и (18) для калориметра с образцами из железа и меди. Теплоемкость исследуемого тела определим как разность теплоемкостей калориметра с образцом и пустого калориметра.

Массы двух образцов:

$$m_{Fe} = (814,8 \pm 0,5) \text{ г}, \quad m_{Cu} = (565,7 \pm 0,5) \text{ г}$$



- Для железа

$$k_1 = \frac{\lambda}{C} = 0,000368 \text{ с}^{-1}$$

$$k_2 = \frac{P}{\lambda} = 18,881 \text{ К} \rightarrow \lambda = \frac{P}{k_2} = 0,326 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$$

$$C_{+Fe} = \frac{\lambda}{k_1} = 885,9 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{Fe} = C_{+Fe} - C = 257,6 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$c_{Fe} = \frac{C_{Fe}}{m_{Fe}} = 316,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

- Для меди

$$k_1 = \frac{\lambda}{C} = 0,0002074 \text{ с}^{-1}$$

$$k_2 = \frac{P}{\lambda} = 33,53 \text{ К} \rightarrow \lambda = \frac{P}{k_2} = 0,183 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}$$

$$C_{+Cu} = \frac{\lambda}{k_1} = 882,4 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{Cu} = C_{+Cu} - C = 254,1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$c_{Cu} = \frac{C_{Cu}}{m_{Cu}} = 449,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

20. Оценим погрешность результатов:

- Для пустого калориметра:

$$\varepsilon_{k_1}^{\text{МНК}} = 0,0014$$

$$\varepsilon_{ln} = \frac{\varepsilon((T_{cool} - T_K)/(T - T_K))}{<(T_{cool} - T_K)/(T - T_K)>} \sim 10^{-11}$$

$$\varepsilon_{k_1}^{\text{КОСВ}} = \sqrt{(\varepsilon_{ln})^2 + (\varepsilon_t)^2} \approx \varepsilon_t = 0,005$$

$$\varepsilon_{k_1} = \sqrt{(\varepsilon_{k_1}^{\text{МНК}})^2 + (\varepsilon_{k_1}^{\text{КОСВ}})^2} = 0,005$$

$$\varepsilon_{k_2}^{\text{МНК}} = 0,0009$$

$$\varepsilon_{exp} = \frac{\lambda}{C} \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_{k_2}^{\text{КОСВ}} = \sqrt{(\varepsilon_{T_{heat}})^2 + (\varepsilon_{exp})^2} = 0,012$$

$$\varepsilon_{k_2} = \sqrt{(\varepsilon_{k_2}^{\text{МНК}})^2 + (\varepsilon_{k_2}^{\text{КОСВ}})^2} = 0,012$$

$$\varepsilon_{\lambda} = \sqrt{(\varepsilon_P)^2 + (\varepsilon_{k_2})^2} = 0,02$$

$$\varepsilon_C = \sqrt{(\varepsilon_\lambda)^2 + (\varepsilon_{k_1})^2} = 0,02$$

$$\sigma_C = C \cdot \varepsilon_C = 13 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

окончательный результат:

$$C = (628 \pm 13) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

- Для железа:

$$\varepsilon_{k_1}^{\text{МНК}} = 0,007$$

$$\varepsilon_{ln} = \frac{\varepsilon((T_{cool} - T_K)/(T - T_K))}{< (T_{cool} - T_K)/(T - T_K) >} \sim 10^{-10}$$

$$\varepsilon_{k_1}^{\text{КОСВ}} = \sqrt{(\varepsilon_{ln})^2 + (\varepsilon_t)^2} \approx \varepsilon_t = 0,02$$

$$\varepsilon_{k_1} = \sqrt{(\varepsilon_{k_1}^{\text{МНК}})^2 + (\varepsilon_{k_1}^{\text{КОСВ}})^2} = 0,02$$

$$\varepsilon_{k_2}^{\text{МНК}} = 0,0003$$

$$\varepsilon_{exp} = \frac{\lambda}{C} \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_{k_2}^{\text{КОСВ}} = \sqrt{(\varepsilon_{T_{heat}})^2 + (\varepsilon_{exp})^2} = 0,004$$

$$\varepsilon_{k_2} = \sqrt{(\varepsilon_{k_2}^{\text{МНК}})^2 + (\varepsilon_{k_2}^{\text{КОСВ}})^2} = 0,004$$

$$\varepsilon_\lambda = \sqrt{(\varepsilon_P)^2 + (\varepsilon_{k_2})^2} = 0,011$$

$$\varepsilon_{C_{+Fe}} = \sqrt{(\varepsilon_\lambda)^2 + (\varepsilon_{k_1})^2} = 0,02$$

$$\sigma_{C_{+Fe}} = C_{+Fe} \cdot \varepsilon_{C_{+Fe}} = 18 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{+Fe} = (886 \pm 18) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{Fe} = (260 \pm 20) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$\varepsilon_{c_{Fe}} = \sqrt{(\varepsilon_{C_{Fe}})^2 + (\varepsilon_{m_{Fe}})^2} = 0,08$$

$$\sigma_{c_{Fe}} = c_{Fe} \cdot \varepsilon_{c_{Fe}} = 30 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

окончательный результат:

$$c_{Fe} = (320 \pm 30) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

- Для меди:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{k_1}^{\text{МНК}} &= 0,002 \\ \varepsilon_{ln} &= \frac{\varepsilon((T_{cool} - T_K)/(T - T_K))}{<(T_{cool} - T_K)/(T - T_K)>} \sim 10^{-11} \\ \varepsilon_{k_1}^{\text{КОСВ}} &= \sqrt{(\varepsilon_{ln})^2 + (\varepsilon_t)^2} \approx \varepsilon_t = 0,01 \\ \varepsilon_{k_1} &= \sqrt{(\varepsilon_{k_1}^{\text{МНК}})^2 + (\varepsilon_{k_1}^{\text{КОСВ}})^2} = 0,01\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{k_2}^{\text{МНК}} &= 0,0009 \\ \varepsilon_{exp} &= \frac{\lambda}{C} \varepsilon_t \\ \varepsilon_{k_2}^{\text{КОСВ}} &= \sqrt{(\varepsilon_{T_{heat}})^2 + (\varepsilon_{exp})^2} = 0,0016 \\ \varepsilon_{k_2} &= \sqrt{(\varepsilon_{k_2}^{\text{МНК}})^2 + (\varepsilon_{k_2}^{\text{КОСВ}})^2} = 0,018\end{aligned}$$

$$\varepsilon_\lambda = \sqrt{(\varepsilon_P)^2 + (\varepsilon_{k_2})^2} = 0,02$$

$$\varepsilon_{C+Cu} = \sqrt{(\varepsilon_\lambda)^2 + (\varepsilon_{k_1})^2} = 0,02$$

$$\sigma_{C+Cu} = C_{+Cu} \cdot \varepsilon_{C+Cu} = 18 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{+Cu} = (882 \pm 18) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{Cu} = (250 \pm 20) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$\varepsilon_{c_{Cu}} = \sqrt{(\varepsilon_{C_{Cu}})^2 + (\varepsilon_{m_{Cu}})^2} = 0,08$$

$$\sigma_{c_{Cu}} = c_{Cu} \cdot \varepsilon_{c_{Cu}} = 40 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

окончательный результат:

$$c_{Cu} = (450 \pm 40) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

21. Определим теплоемкости пустого калориметра, образцов из железа и алюминия альтернативными методами по формулам (12) и (15)-(16).

- по формуле (12) для пустого калориметра:

$$\begin{aligned}\left(\frac{dT_{heat}}{dt}\right)_{T=T_K} &= 0,0092 \frac{\text{К}}{\text{с}} \\ \varepsilon_{frac} &= \sqrt{(\varepsilon_{T_{heat}})^2 + (\varepsilon_t)^2} = 0,01 \\ C &= \frac{P}{(dT_{heat}/dt)_{T=T_K}} = 668,5 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}\end{aligned}$$

$$\varepsilon_C = \sqrt{(\varepsilon_P)^2 + (\varepsilon_{frac})^2} = 0,02$$

$$\sigma_C = C \cdot \varepsilon_C = 13 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Окончательный результат:

$$C = (669 \pm 13) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

- по формуле (12) для калориметра с железом:

$$\left( \frac{dT_{heat}}{dt} \right)_{T=T_k} = 0,0064 \frac{\text{К}}{\text{с}}$$

$$\varepsilon_{frac} = \sqrt{(\varepsilon_{T_{heat}})^2 + (\varepsilon_t)^2} = 0,01$$

$$C_{+Fe} = \frac{P}{(dT_{heat}/dt)_{T=T_k}} = 960,9 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$\varepsilon_{C_{+Fe}} = \sqrt{(\varepsilon_P)^2 + (\varepsilon_{frac})^2} = 0,02$$

$$\sigma_{C_{+Fe}} = C_{+Fe} \cdot \varepsilon_{C_{+Fe}} = 19 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{+Fe} = (961 \pm 19) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{Fe} = (290 \pm 20) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$c_{Fe} = \frac{C_{Fe}}{m_{Fe}} = 356 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Окончательный результат:

$$c_{Fe} = (360 \pm 30) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

- по формуле (12) для калориметра с медью:

$$\left( \frac{dT_{heat}}{dt} \right)_{T=T_k} = 0,0069 \frac{\text{К}}{\text{с}}$$

$$\varepsilon_{frac} = \sqrt{(\varepsilon_{T_{heat}})^2 + (\varepsilon_t)^2} = 0,01$$

$$C_{+Cu} = \frac{P}{(dT_{heat}/dt)_{T=T_k}} = 891,3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$\varepsilon_{C_{+Cu}} = \sqrt{(\varepsilon_P)^2 + (\varepsilon_{frac})^2} = 0,02$$

$$\sigma_{C_{+Cu}} = C_{+Cu} \cdot \varepsilon_{C_{+Cu}} = 18 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{+Cu} = (890 \pm 18) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$



$$C_{Cu} = (220 \pm 30) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$c_{Cu} = \frac{C_{Cu}}{m_{Cu}} = 389 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Окончательный результат:

$$c_{Cu} = (390 \pm 50) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

- По формулам (15) и (16) для пустого калориметра: В районе  $T = 306 \text{ К}$ :

$$A = 0,00577 \frac{\text{К}}{\text{с}}$$

$$B = -0,00371 \frac{\text{К}}{\text{с}}$$

$$T_{\text{к1}} = 298,839072 \text{ К}$$

$$T_{\text{к2}} = 299,021639 \text{ К}$$

$$C = 657,3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$\varepsilon_C \approx \varepsilon(A - B) = 0,04$$

$$\sigma_C = C\varepsilon_C = 30 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Окончательный результат:

$$C = (660 \pm 30) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

- По формулам (15) и (16) для калориметра с железом: В районе  $T = 306,8 \text{ К}$ :

$$A = 0,0055 \frac{\text{К}}{\text{с}}$$

$$B = -0,0015 \frac{\text{К}}{\text{с}}$$

$$T_{\text{к1}} = 299,681507 \text{ К}$$

$$T_{\text{к2}} = 299,410418 \text{ К}$$

$$C_{+Fe} = 953,1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$\varepsilon_{C_{+Fe}} \approx \varepsilon(A - B) = 0,03$$

$$\sigma_{C_{+Fe}} = C_{+Fe}\varepsilon_{C_{+Fe}} = 30 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{+Fe} = (950 \pm 30) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{Fe} = (290 \pm 40) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Окончательный результат:

$$c_{Fe} = (360 \pm 50) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

- По формулам (15) и (16) для калориметра с медью: В районе  $T = 306,3 \text{ К}$ :

$$A = 0,00444 \frac{\text{К}}{\text{с}}$$

$$B = 0,00251 \frac{\text{К}}{\text{с}}$$

$$T_{k1} = 299,772845 \text{ К}$$

$$T_{k2} = 299,680899 \text{ К}$$

$$C_{+Cu} = 877,2 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$\varepsilon_{C_{+Cu}} \approx \varepsilon(A - B) = 0,05$$

$$\sigma_{C_{+Cu}} = C_{+Cu} \varepsilon_{C_{+Cu}} = 40 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{+Cu} = (880 \pm 40) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$C_{Cu} = (220 \pm 50) \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Окончательный результат:

$$c_{Cu} = (390 \pm 90) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

22. Сравним точность интегрального и дифференциальных методов определения теплоемкостей, как между собой, так и с теоретическими и табличными значениями.

Для железа получили:

- интегральным методом  $(320 \pm 30) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- дифференциальным методом с помощью точки пересечения  $T_{heat}(t)$  и  $T_k(t)$   $(360 \pm 30) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- дифференциальным методом с помощью кривых  $T_{cool}(t)$  и  $T_{heat}(t)$   $(360 \pm 50) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- табличное значение:  $445 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Для меди получили:

- интегральным методом  $(450 \pm 50) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- дифференциальным методом с помощью точки пересечения  $T_{heat}(t)$  и  $T_k(t)$   $(390 \pm 50) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- дифференциальным методом с помощью кривых  $T_{cool}(t)$  и  $T_{heat}(t)$   $(390 \pm 90) \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- табличное значение:  $385 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Видим, что между собой хорошо сходятся значения, полученные дифференциальными методами, интегральные далековато отстоят от них. Также заметим, что значения для, полученные в ходе эксперимента дифференциальными методами, очень хорошо сходятся с табличными. Для железа все не так радужно, тем не менее, расхождение всех результатов с табличными можно объяснить наличием примесей с низкой теплоемкостью в железном образце.

## Вывод

Мы измерили кривые нагревания  $T_{heat}(t)$  и охлаждения  $T_{cool}(t)$  пустого калориметра и системы «калориметр + твердое тело», определили теплоемкости пустого калориметра и твердых тел интегральными и дифференциальными методами, также определили удельные теплоемкости железа и меди. Опыт показал, что более точными являются в наших условиях дифференциальные методы, что подтверждается теоретическим предположением об ошибке интегрального метода: в ходе эксперимента комнатная температура изменялась где-то на 2-3 градуса Цельсия, что привело к большим ошибкам в первом методе. Также можно предположить, что железный образец является сплавом железа и некоторого металла со значительно низкой (по сравнению с теплоемкостью железа) удельной теплоемкостью.