

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(государственный университет)

Лабораторная работа 2.1.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Составители:

Воробьев А.С.

Попов П.В.

Яворский В.А.

Долгопрудный 2024

Лабораторная работа 2.1.4

Определение теплоемкости твердых 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 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 - термopара 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.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе измерение теплоемкости твердых тел производится по стандартной схеме. Исследуемое тело помещается в калориметр с нагревателем мощностью P . Пусть ΔQ – количество тепла, подведенное к системе «тело + калориметр» за время Δt , а ΔT – изменение её температуры, произошедшее в результате подвода тепла ΔQ . 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 λ – 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:

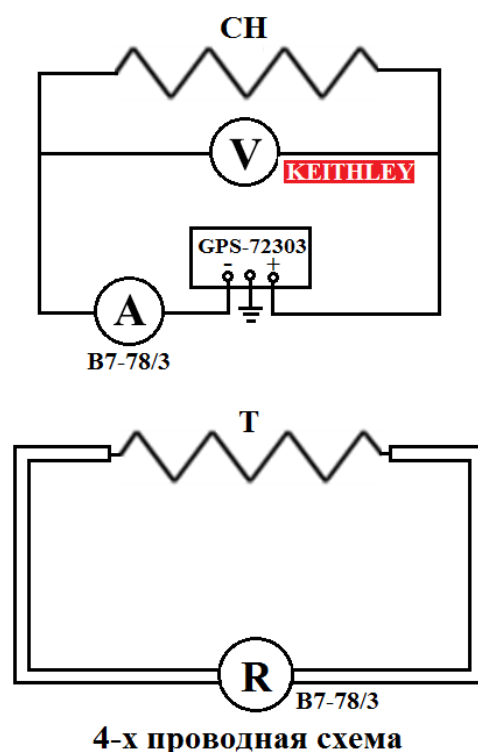
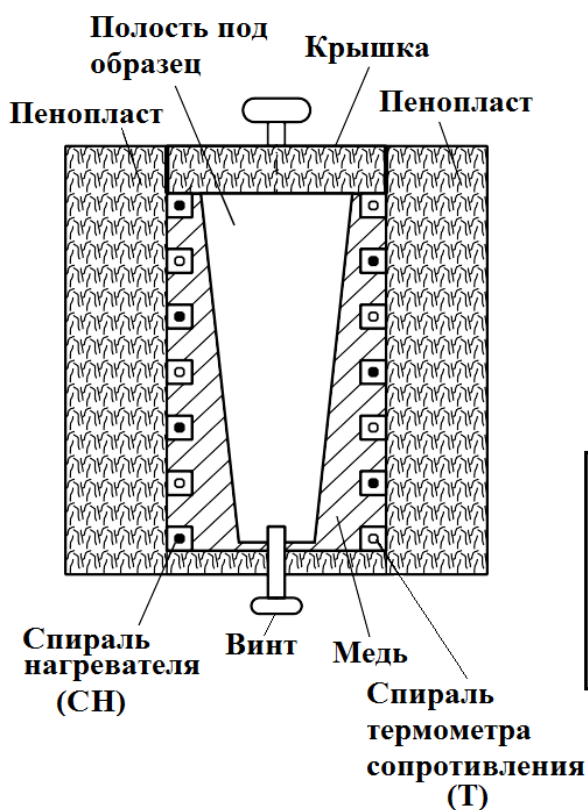
$$CdT = Pdt - \lambda[T_{heat}(t) - T_k(t)]dt \quad (3)$$

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

где P – мощность нагревателя, 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, $T_k(t)$ – 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 донышке внутренней стенки калориметра. В стенку калориметра вмонтированы спираль нагревателя (СН) и спираль термометра сопротивления (далее термометр или терморезистор).

Экспериментально измеряемые данные:

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

Кривые $R_{\text{heat}}(t)$, $R_{\text{cool}}(t)$ и $T_{\text{к}}(t)$ записываются по точкам с шагом по оси времени $\Delta t = 1$ с при помощи компьютерной программы АК ИП, 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 калориметра (рис. 1). Известно, что сопротивление проводника изменяется с температурой по закону:

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

где R_T — сопротивление термометра при T К, R_{273} — его сопротивление при 273 К, α — температурный коэффициент сопротивления.

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

$$R_{273} = \frac{R_{\text{к}}}{1 + \alpha(T_{\text{к}} - 273)} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), найдем:

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

Формула (7) позволяет легко пересчитать кривые $R_{heat}(t)$, $R_{cool}(t)$ в кривые $T_{heat}(t)$, $T_{cool}(t)$. Входящий в формулу температурный коэффициент сопротивления меди равен $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$.

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 :

$$\frac{CdT_{cool}}{-\lambda[T_{cool} - T_K]} = dt \quad (9)$$

После интегрирования в пределах от $t=0$ ($T_{cool}=T$) до произвольного момента времени t :

$$\frac{-C}{\lambda} \ln \frac{T_{cool} - T_K}{T - T_K} = t \quad (10)$$

Отсюда находим явную зависимость T_{cool} от времени:

$$T_{cool}(t) = (T - T_K)e^{\frac{-\lambda}{C}t} + T_K \quad (11)$$

Уравнение (10) легко спрямляется в координатах $(\ln \frac{T_{cool}-T_K}{T-T_K}, t)$. Тангенс угла наклона данной прямой позволяет определить отношение искомых величин $\frac{\lambda}{C}$.

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

$$CdT_{heat} = Pdt - \lambda[T_{heat} - T_K]dt \quad (12)$$

Это дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными T_{heat} и t :

$$\frac{CdT_{heat}}{P - \lambda[T_{heat} - T_K]} = dt \quad (13)$$

После интегрирования в пределах от $t=0$ ($T_{heat}=T_K$) до произвольного момента времени t :

$$\frac{-C}{\lambda} \ln \frac{P - \lambda(T_{heat} - T_K)}{P} = t \quad (14)$$

Отсюда находим явную зависимость T_{heat} от времени:

$$T_{heat}(t) = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{\frac{-\lambda}{C}t}) + T_K \quad (15)$$

Уравнение (15) позволяет по найденному ранее из кривой охлаждения отношению $\frac{\lambda}{C}$ определить λ , а зная λ и $\frac{\lambda}{C}$ легко найти искомую теплоемкость C .

Метод измерений величин C и λ , рассмотренный выше, дает хорошие результаты при стабильной комнатной температуре во время проведения эксперимента и является по своей сути интегральным. C и λ определяются из уравнений (11) и (15), которые следуют из уравнений (3) и (4) после их интегрирования. При существенных колебаниях комнатной температуры ($\sim 2-3$ °C) интегральные уравнения (11) и (15) могут привести к достаточно большой погрешности в определении величин C и λ . В этом случае следует использовать дифференциальные методы, основанные на измерении величин $\left(\frac{dT}{dt}\right)_{heat}$ и $\left(\frac{dT}{dt}\right)_{cool}$ в окрестностях каких-либо «удобных» точек. К таким «удобным» точкам относится точка на кривой нагревания, при которой температура калориметра совпадает с комнатной. Действительно, дифференцируя уравнение (3) по времени при $T_{heat}(t) = T_K(t)$, получим простую и удобную формулу для определения теплоемкости C :

$$C = \frac{P}{(dT_{heat}/dt)_{T=T_K}} \quad (16)$$

Она дает хорошие результаты, если ее применение никак не связано с моментом включения нагревателя. Причина проста: сразу после включения нагревателя в калориметре происходят переходные процессы формирования тепловых потоков, которые не описываются уравнением (3) и соответственно уравнением (16). Чтобы обойти данную трудность, перед включением нагревателя необходимо охладить калориметр до температуры на $\sim 2-5$ °C ниже комнатной. В этом случае при подходе к точке $T_{heat}(t) = T_K(t)$ все переходные процессы уже закончатся и уравнение (16) будет корректным.

Другими «удобными» точками для определения C и λ являются точки при одной и той же температуре T на кривых нагревания $T_{heat}(t)$ и охлаждения $T_{cool}(t)$ соответственно. Действительно продифференцируем уравнения (3) и (4) по времени:

$$C \left(\frac{dT}{dt} \right)_{heat} = P - \lambda [T_{heat}(t) - T_k(t)] \quad (17)$$

$$C \left(\frac{dT}{dt} \right)_{cool} = -\lambda [T_{cool}(t) - T_k(t)] \quad (18)$$

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 (17) и (18), получим следующие выражения для C и λ :

$$\lambda = \frac{P}{(T - T_{k2}) \left(1 - \frac{A}{B} \right) + T_{k2} - T_{k1}} \quad (19)$$

$$C = \frac{P}{A - B + A \frac{T_{k1} - T_{k2}}{T - T_{k1}}} \quad (20)$$

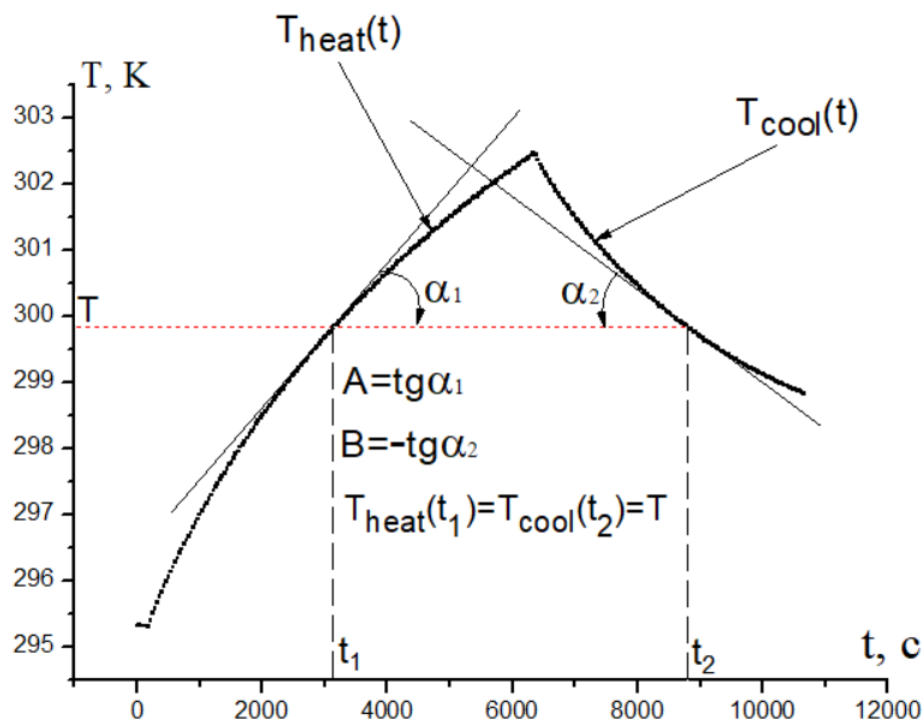
где T_{k1} и T_{k2} – комнатная температура в моменты времени $t=t_1$ и $t=t_2$, когда $T_{heat}(t_1) = T_{cool}(t_2) = T$.

В случае равенства комнатных температур, когда $T_{k1} = T_{k2} = T_k$ формулы (19) и (20) упрощаются:

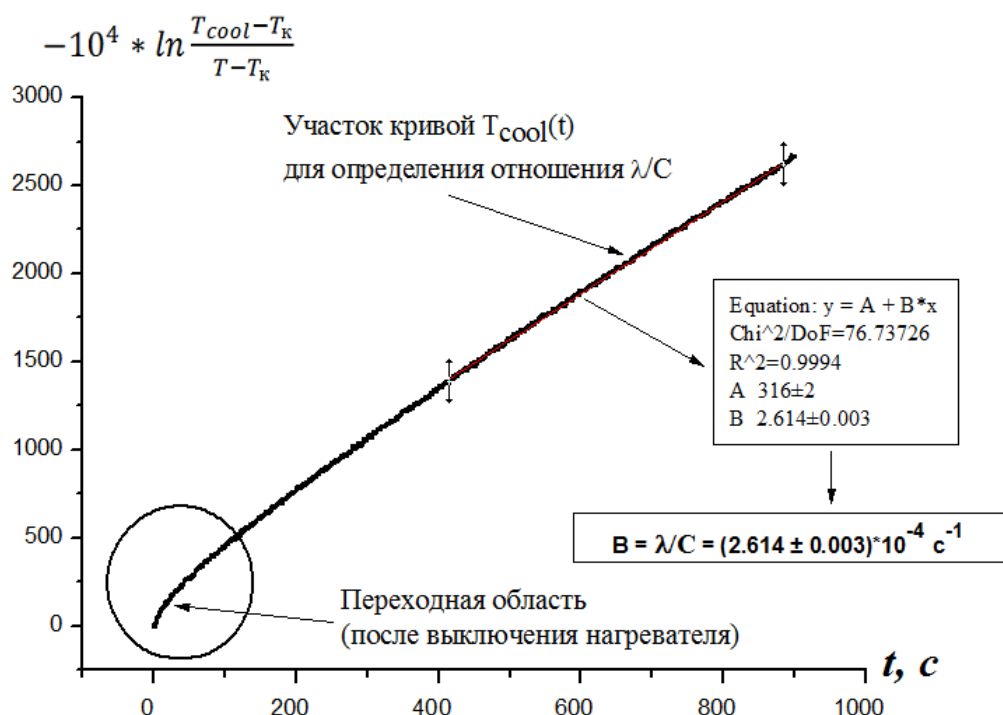
$$\lambda = \frac{P}{(T - T_k) \left(1 - \frac{A}{B} \right)} \quad (21)$$

$$C = \frac{P}{A - B} \quad (22)$$

Следует иметь в виду, что определение величины B на кривой охлаждения $T_{cool}(t)$ необходимо производить на участках кривой достаточно далеких от момента выключения нагревателя, после того как в калориметре закончатся переходные процессы «переполюсовки» тепловых потоков. Корректный интервал времени для определения B можно определить экспериментально из кривой $T_{cool}(t)$, спрямляя ее в



координатах $(\ln \frac{T_{\text{cool}} - T_{\text{к}}}{T - T_{\text{к}}}, t)$, после чего исключить из рассмотрения начальный нелинейный участок:



ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ КАЛОРИМЕТРА

Главная проблема калориметрического метода измерения теплоемкости – измерение температуры тела при его нагревании. В

процессе нагревания температура тела неравномерно распределена по его объему. Из-за явления теплопроводности на поверхности тела она всегда выше. Термометр сопротивления, используемый в работе, измеряет температуру близкую к поверхности. Для минимизации погрешности в определении температуры важно, чтобы максимальная разница температур внутри тела и на его поверхности была как можно меньше. Ниже, по известным литературным данным для коэффициентов теплопроводности χ , плотности ρ , и удельной теплоемкости $C_{уд}$, приведена оценка коэффициентов температуропроводности κ железа, алюминия, латуни, меди при стандартных условиях.

Коэффициенты температуропроводности:

Железо (Fe): $\kappa = \chi / \rho C_{уд} = 80,4 / 7870 \cdot 460 = 2.221 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

Алюминий (Al): $\kappa = \chi / \rho C_{уд} = 237 / 2700 \cdot 902.5 = 9.726 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

Латунь (Cu+Zn): $\kappa = \chi / \rho C_{уд} = 121 / 8730 \cdot 400 = 3.465 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

Медь: $\kappa = \chi / \rho C_{уд} = 401 / 8933 \cdot 384.2 = 11.684 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

Исходя из величин κ и характерных размеров, можно оценить среднее время выравнивания температуры в исследуемых образцах и медной рубашке калориметра:

Железо (Fe): $t \sim L^2 / \kappa = 0.02^2 / 2.221 \cdot 10^{-5} = 18 \text{ с}$

Алюминий (Al): $t \sim L^2 / \kappa = 0.02^2 / 9.726 \cdot 10^{-5} = 4 \text{ с}$

Латунь (Cu+Zn): $t \sim L^2 / \kappa = 0.02^2 / 3.465 \cdot 10^{-5} = 12 \text{ с}$

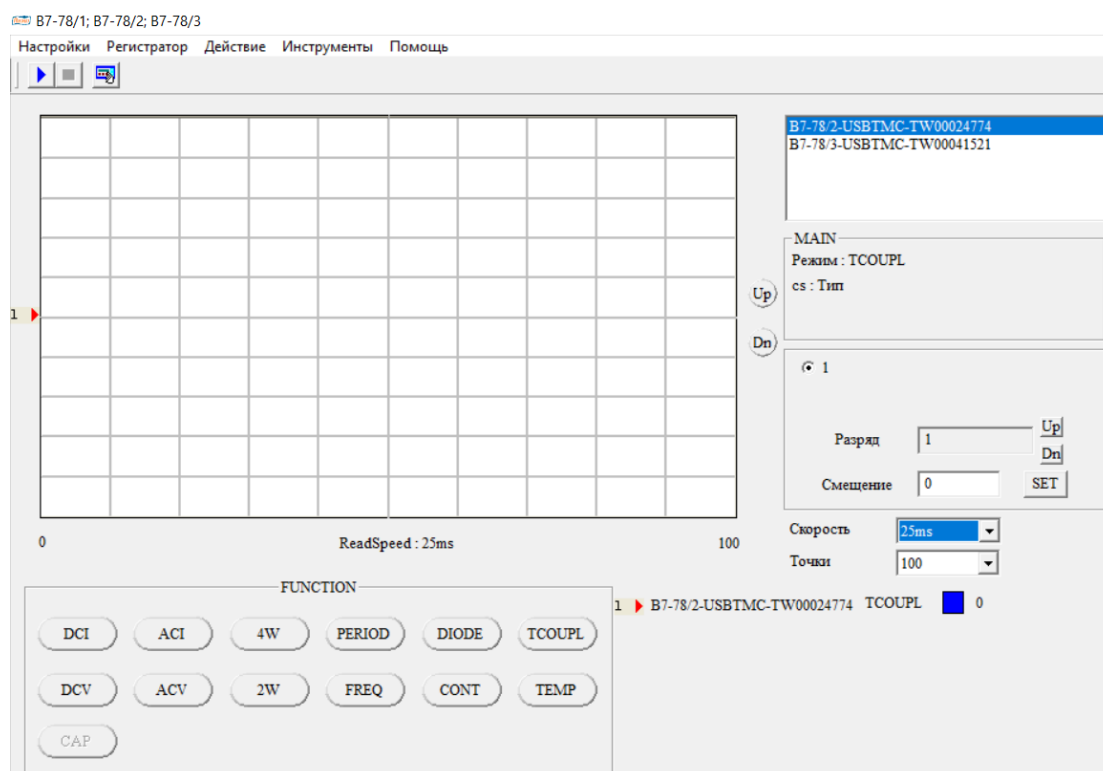
Медь: $t \sim L^2 / \kappa = 0.03^2 / 11.684 \cdot 10^{-5} = 11.7 \text{ с}$

При требуемой точности в определении температуры тела, полученные оценки позволяют подобрать необходимую мощность нагревателя. Для данной работы вполне разумно, чтобы максимальная разница температур внутри тела и на его поверхности не превышала точность определения температуры терморезистора с помощью омметра, то есть не более 0.15°C . Тогда мощность нагревателя должна быть такова, чтобы за характерное время выравнивания температур ($\sim 20 \text{ с}$), температура на его поверхности возросла не более, чем на 0.15°C . Подбор мощности нагревателя по данной методике для

используемого в работе калориметра дает величину необходимой мощности $P \leq 6$ Вт.

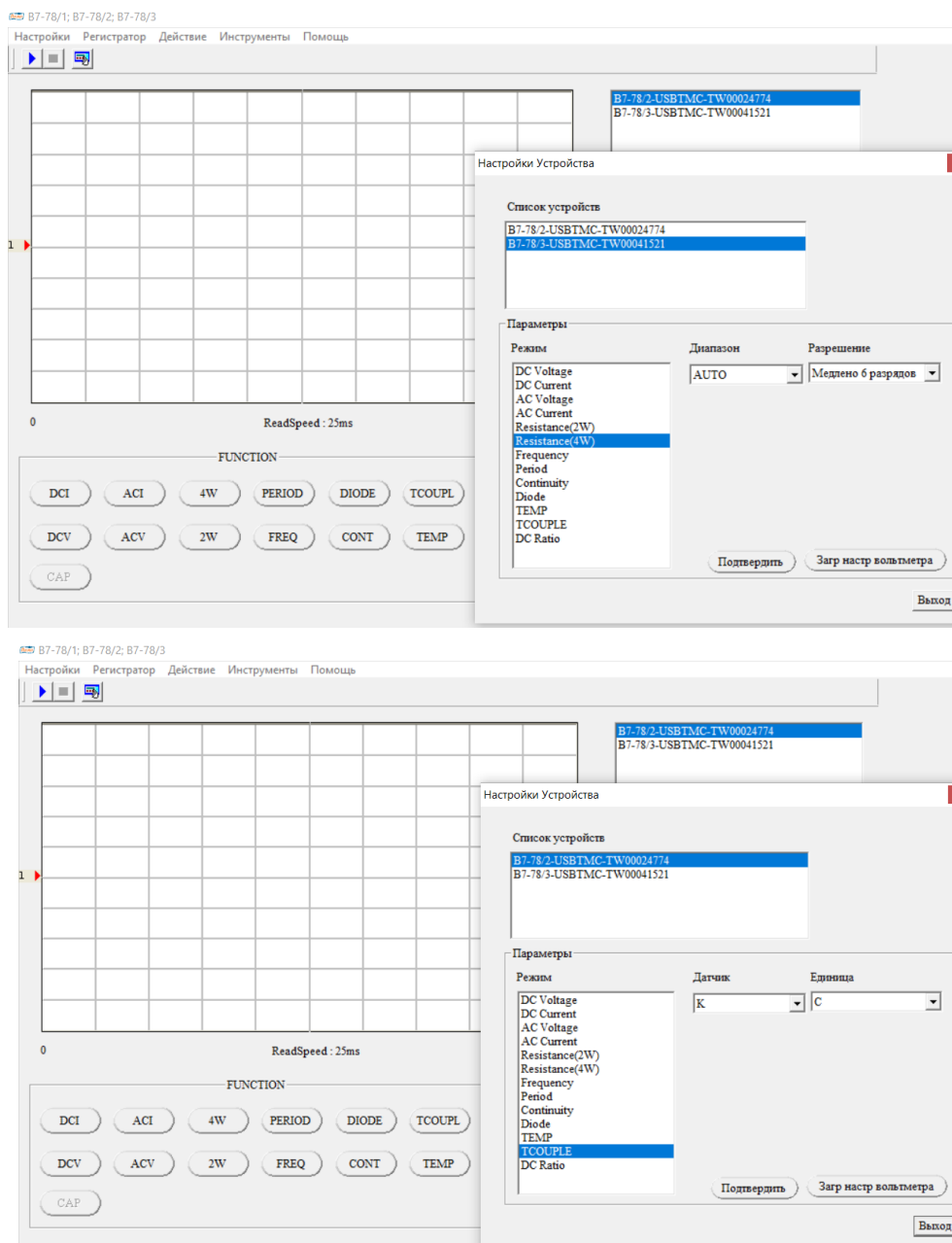
Подготовка к эксперименту

1. Включите в сеть измерительные приборы: источник питания GPS-72303 (кнопка «POWER», **кнопку «OUTPUT» не включать!**), два универсальных вольтметра В7-78/3 (кнопка «Сеть»), универсальный вольтметр В7-78/2 (кнопка «Сеть»), универсальный вольтметр KEITHLEY (кнопка «POWER»). Установите требуемые режимы работы мультиметров. Универсальный вольтметр В7-78/2 переведите в режим измерения температуры с помощью термопары К-типа (последовательное нажатие кнопок «преф» и «темп»). Универсальный вольтметр В7-78/3 (1) переведите в режим измерения сопротивления по четырехточечной схеме (последовательное нажатие кнопок «преф» и «Ω2»), еще один универсальный вольтметр В7-78/3 (2) переведите в режим измерения постоянного тока (последовательное нажатие кнопок «преф» и «U=»). Убедитесь, что универсальный вольтметр KEITHLEY при включении автоматически перешел в режим измерения постоянного напряжения (V DC).
2. Включите компьютер (ноутбук MSI). Убедитесь в том, что он не подключен к интернету и запустите с рабочего стола программу АКПП В7-78 PT-Tool.



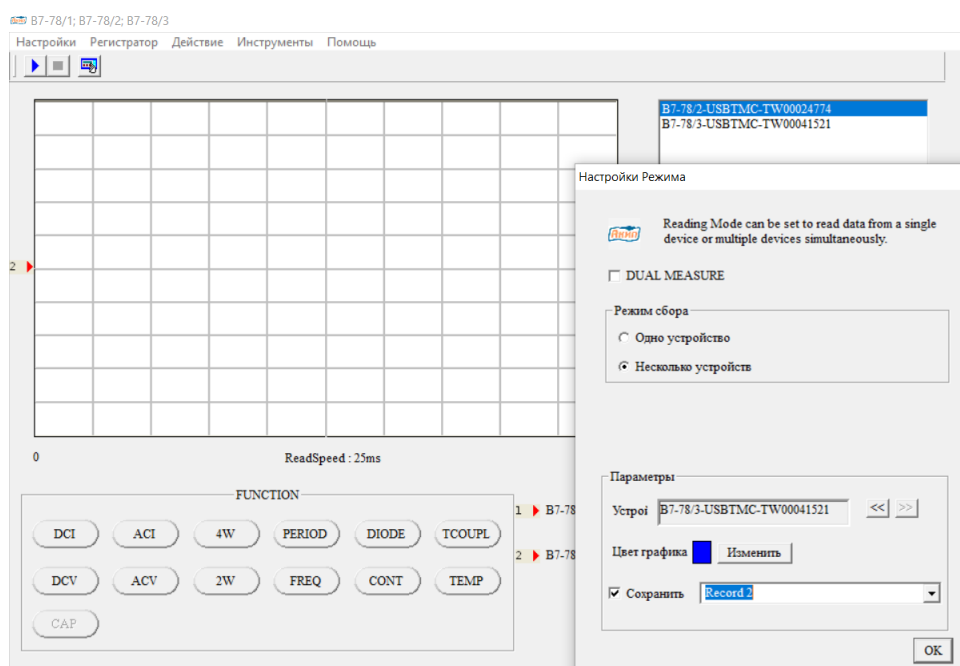
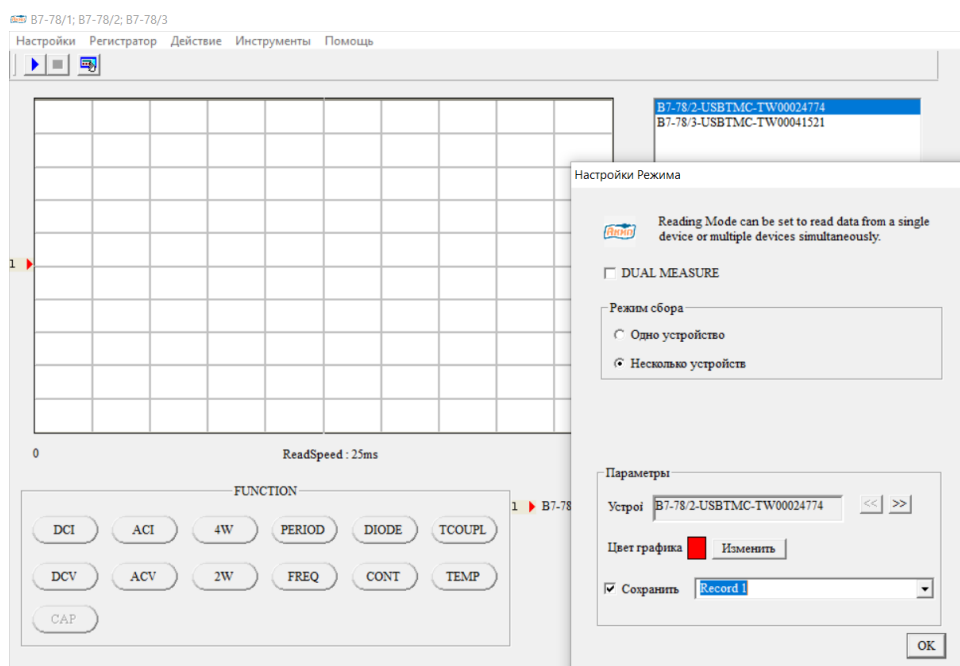
Убедитесь, что программа видит универсальные вольтметры В7-78/2 и В7-78/3, предназначенные соответственно для измерения временной зависимости комнатной температуры (термопара К-типа) в градусах $^{\circ}\text{C}$ и сопротивления спирали термометра (Т) в Омах.

- Из меню «Настройки» выберите пункт «Настройки устройства». Для каждого прибора из списка устройств выберите необходимый режим, путем нажатия соответствующих кнопок подтвердите и загрузите настройки вольтметров. Нажмите «Выход».



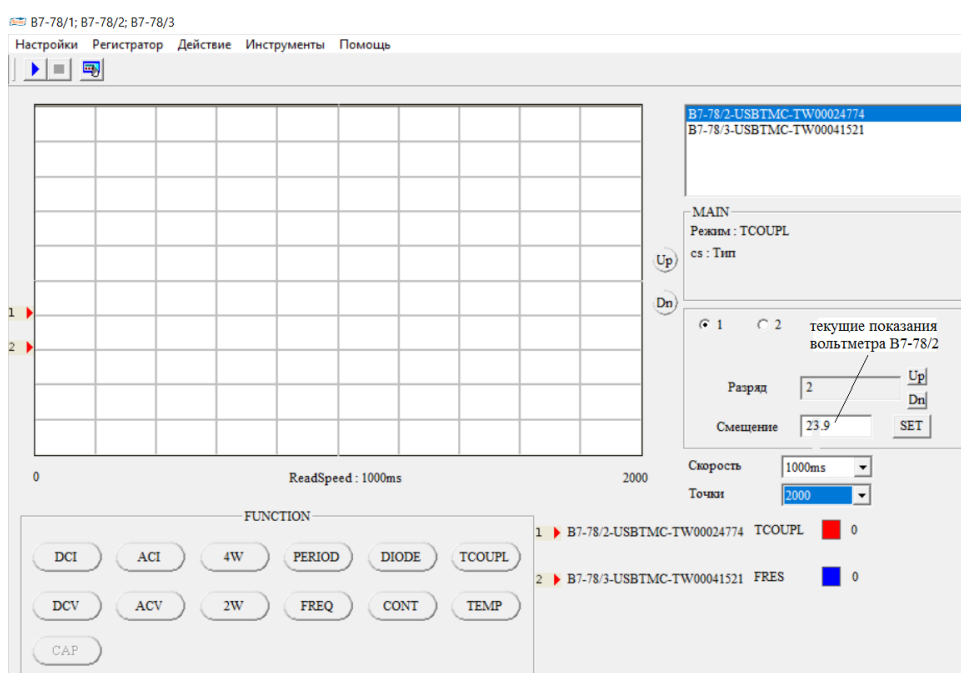
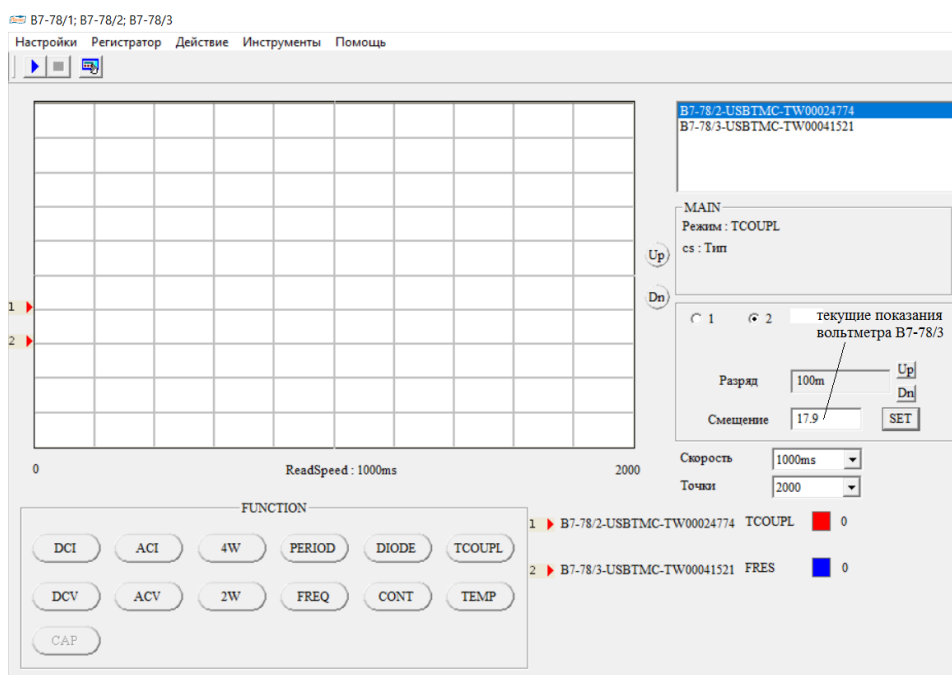
- Из меню «Настройки» выберите пункт «Настройки Режимов». Отметьте режим сбора «Несколько устройств». В разделе «параметры» для каждого из вольтметров выберите необходимый «цвет графика» и

номер файла записи (например, Record1 и Record2). Поставьте галочку «Сохранить» и нажмите ОК.

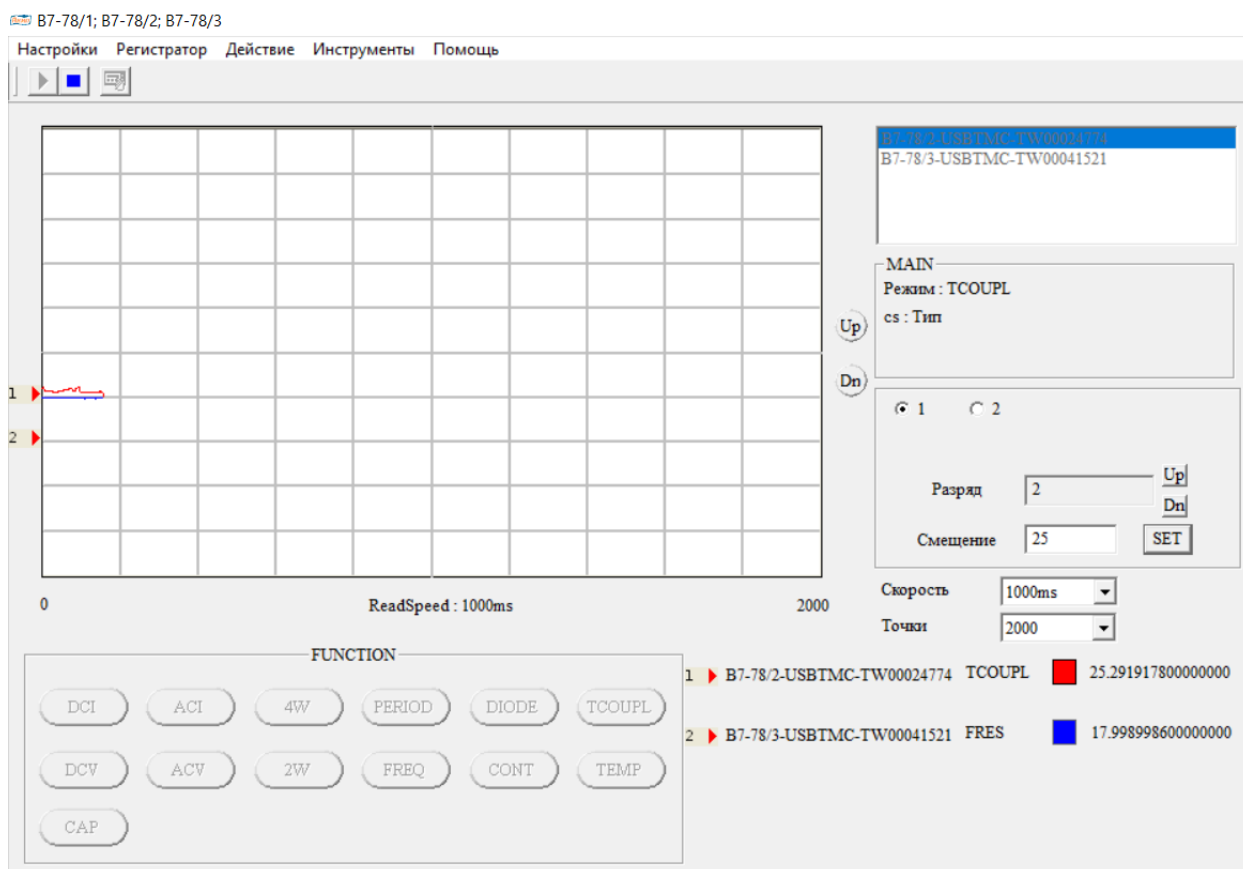


- В главном окне программы выберите «разряд» (цена деления измеряемой величины по оси ординат) и «смещение» графика в целых единицах измеряемой величины относительно горизонтальных курсоров 1 и 2 (каждому курсору соответствует свой прибор). Курсоры 1 и 2 вместе с соответствующими графиками можно перемещать кнопками «Up» и «Dn». Далее выберите «скорость» записи (промежуток времени между двумя последовательными измерениями) и количество точек («точки») на всю длину графического окна программы по горизонтали (оси времени). Рекомендуемые значения указанных выше

величин приведены ниже на соответствующих скриншотах. Стоит отметить, что при рекомендованных параметрах «скорость» и «точки» программа обрабатывает полученные экспериментальные данные достаточно медленно и поэтому все текущие измерения не сразу отражаются на графике. Время запаздывания примерно ~ 40 секунд. Примерно с таким же запаздыванием реагирует программа и на любые изменения разряда и смещения во время записи кривых. В связи с этим при необходимости первоначальную настройку параметров «разряд» и «смещение» удобно производить при более низких значениях «скорость» и «точки».



6. Подготовьте лабораторный журнал для фиксации времени ключевых действий и параметров. Так как запись данных происходит непрерывно в течении всей работы, то в лабораторном журнале необходимо фиксировать только ключевые события и их время по часам ноутбука. Это необходимо, чтобы в дальнейшем при обработке полученных данных легко сопоставить их со своими действиями.
7. **Нажмите кнопку «старт» в верхнем левом углу программы и не выключайте ее вплоть до окончания выполнения лабораторной работы!** Примерно через 40 секунд в графическом окне программы появятся кривые двух разных цветов, отражающие временные изменения значений комнатной температуры (красная кривая) и сопротивления медной спирали терморезистора (синяя кривая). Ось времени данных кривых направлена справа налево! Их главное предназначение – визуальный контроль (качественный и полуколичественный) за текущими изменениями указанных величин в течении всего времени проведения измерений. Точные значения измеряемых величин в зависимости от времени будут извлечены из соответствующих CSV-файлов после выполнения лабораторной работы.



Проведение измерений

1. Охладите калориметр до температуры на $\sim 2-5$ °C ниже комнатной. Температуру калориметра удобно контролировать по калибровочной кривой $T(R)$ терморезистора (график на миллиметровке рядом с установкой). Для этого вставьте в калориметр охлажденный латунный конус. Через 3-4 минуты, после того, как температура в калориметре начнет медленно расти, выньте латунный конус и верните его в емкость с охлажденной водой. Подождите еще 3-4 минуты.
2. При неизменной мощности нагревателя определите зависимость сопротивления терморезистора (T) от времени $R_{\text{heat}}(t)$ для пустого калориметра. Для этого замкните цепь спирали нагревателя СН (нажмите кнопку «OUTPUT» на источнике питания GPS-72303, при этом под кнопкой должна загореться зеленая лампочка). Следите за изменением температуры калориметра (см. на столе калибровочную кривую терморезистора). После того, как температура в калориметре превысит комнатную на $8-9$ °C (\sim через 25-30 минут), отключите цепь спирали нагревателя СН от источника питания GPS-72303. Для этого нажмите кнопку «OUTPUT», при этом зеленая лампочка под кнопкой должна погаснуть.
3. Определите зависимость сопротивления терморезистора (T) от времени $R_{\text{cool}}(t)$ при охлаждении пустого калориметра. Для этого продолжайте следить за изменением температуры калориметра. После того, как температура в калориметре уменьшится на 1-2 градуса по сравнению с температурой на момент выключения спирали нагревателя (СН), можно приступить к измерению теплоемкости калориметра вместе с исследуемым телом.
4. Снова охладите калориметр до температуры на $2-5$ °C ниже комнатной с помощью образца из латуни (см. пункт 1). Вставьте в калориметр исследуемый образец и приступите к измерениям кривых $R_{\text{heat}}(t)$ и $R_{\text{cool}}(t)$, повторив заново пункты 2-3.
5. Измерения проведите для двух образцов из железа и алюминия.
6. После окончания всех измерений нажмите **кнопку «стоп» в верхнем левом углу программы** АКИП В7-78 РТ-Tool. Из меню «Регистратор» выберите пункт «Просмотр Записи». Сохраните CSV файлы записей Record1 и Record2 в папке «Лаба 214» на рабочем столе и у себя флешке. Присваивайте файлам «узнаваемые» имена!

Обработка результатов измерений

1. Откройте CSV-файлы с записями Record1 и Record2 в окне программы Excel. Каждый из указанных файлов представляет собой две колонки цифр. Первая колонка – время измерения показаний соответствующего вольтметра по часам ноутбука в формате часы:минуты:секунды (00:00:00). Вторая колонка – собственно показания вольтметров В7-78/2 и В7-78/3 в °C и в Ом. Колонки построчно отделены друг от друга запятой.
2. Произведите разделение колонок по столбцам. Для этого выделите столбец 1 и в главном меню программы Excel выберите «Данные» и далее «Текст по столбцам». Укажите формат исходных данных с «разделителями». Нажмите далее и в открывшемся окне выберите символ-разделитель «запятая». Нажмите далее и затем «готово».
3. После разделения по столбцам необходимо изменить формат времени «часы: минуты: секунды» на «секунды». Для этого полностью удалите 1 строку с названиями. Выделите первый столбец, нажмите правую кнопку мыши и в открывшемся меню выберите «очистить содержимое». Далее в этом же меню откройте «формат данных» и в подменю «число» выберите числовой формат «числовой». Нажмите ОК. Выделите первую строку в первом столбце данных. Введите начальное значение последовательности - 0. Введите значение в следующей строке, чтобы задать образец заполнения - 1. Выделите ячейки, содержащие начальные значения 0 и 1. Держа нажатой левую кнопку мыши за нижний правый конец выделенного столбца, перетащите маркер заполнения до последней строки первого столбца, ориентируясь на данные второго столбца. Теперь первый столбец отражает время конкретного измерения в секундах от момента старта ($t=0$).
4. Пересчитайте значения второй колонки в файле с показаниями сопротивления терморезистора (вольтметр В7-78/3) из Ом в градусы К согласно формуле (7). Формула пересчета для установки (1):
$$T(R_T) = 14.583955001619313455 * R_T + 39.35514018691588785$$
Для установки (2):
$$T(R_T) = 14.377980252039598845 * R_T + 39.35514018691588785$$
Пересчитайте значения второй колонки в файле с показаниями комнатной температуры (вольтметр В7-78/2) из °C в градусы К.
5. Постройте кривые зависимостей $T_{\text{heat}}(t)$, $T_{\text{cool}}(t)$, $T_k(t)$ на одном графике в любой удобной для Вас программе (Excel, OriginPro, Python).

- Сопоставьте построенный график с отметками времени в вашем лабораторном журнале. Найдите кривые $T_{\text{heat}}(t)$ и $T_{\text{cool}}(t)$ для пустого калориметра, калориметра с образцами из железа и алюминия.
6. Постройте кривую $T_{\text{cool}}(t)$ для пустого калориметра в координатах $(\ln \frac{T_{\text{cool}} - T_{\text{к}}}{T - T_{\text{к}}}, t)$, где $T_{\text{к}}$ – среднее значение комнатной температуры за время измерения. Исключите из рассмотрения начальный нелинейный участок. На линейном участке кривой по тангенсу угла наклона определите отношение искомых величин $\frac{\lambda}{C}$.
 7. Из уравнения (15) определите λ . По найденным значениям λ и $\frac{\lambda}{C}$ вычислите теплоемкость C пустого калориметра.
 8. Повторите пункты (6) и (7) для калориметра с образцами из железа и алюминия. Теплоемкость исследуемого тела определите как разность теплоемкостей калориметра с образцом и пустого калориметра.
 9. Оцените погрешности проведенных измерений.
 10. Определите теплоемкости пустого калориметра, образцов из железа и алюминия альтернативными методами по формулам (16) и (19)-(20). Для определения производных в окрестностях «удобных точек» рекомендуется брать интервал по температуре не более 0.1-0.15 K.
 11. Сравните точность интегрального и дифференциальных методов определения теплоемкостей, как между собой, так и с теоретическими и табличными значениями. Объясните расхождения, оцените факторы, влияющие на погрешность проведенных экспериментов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяются удельные и молярные теплоемкости?
2. Обоснуйте применение главной расчетной формулы работы. Напишите её в дифференциальной форме для процессов нагревания и охлаждения калориметра.
3. Выведите формулу для пересчета кривых $R_{\text{heat}}(t)$, $R_{\text{cool}}(t)$ в кривые $T_{\text{heat}}(t)$, $T_{\text{cool}}(t)$.
4. Получите теоретические зависимости $T_{\text{heat}}(t)$ и $T_{\text{cool}}(t)$.
5. При каких условиях корректно применять интегральный метод определения C и λ ? Какими факторами определяется его точность?

6. Для чего перед снятием кривой нагревания $T_{\text{heat}}(t)$ необходимо охлаждать калориметр на 2-5 °С ниже комнатной?
7. Опишите «удобные точки» на кривых нагревания и охлаждения для применения дифференциальных методов определения C и λ .
8. Чему равна атомная теплоемкость по классической теории? Чему равна молярная теплоемкость химического элемента?
9. Сравните точность интегрального и дифференциальных методов определения теплоемкостей и коэффициентов теплоотдачи калориметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. II. М.: Наука, 1990. §§ 18, 63, 68.
2. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М. Основы физики. Т. 2 Квантовая и статистическая физика. – М.: Физматлит, 2001. Ч. 5. Гл. 2. § 2.2
3. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. – М.: Физматгиз, 1976. Гл. IX. § 138.
4. Коротков П.Ф. Молекулярная физика и термодинамика. – М.: МФТИ, 2001. С. 100–102.
5. Сборник задач по общему курсу физики /Под ред. В.А. Овчинкина. Часть 1. М.: изд-во МФТИ, 1998. С. 158.

Приложение 1

Основные положения классической теории теплоемкости металлов.

Закон Дюлонга и Пти

Согласно классической модели «чистый» металл представляет собой совокупность колеблющихся атомов, расположенных в узлах кристаллической решетки. Каждый атом можно рассматривать как гармонический осциллятор, обладающий тремя колебательными степенями свободы. По теореме Больцмана о равнораспределении энергии по степеням свободы на каждую колебательную степень в среднем приходится энергия, равная kT . Отсюда следует, что молярная теплоёмкость «чистого» металла при постоянном объёме равна $C_V = 3R \approx$

6 кал/(К*моль) \approx 25,12 Дж/(К*моль). В 1819 г. французские учёные П. Дюлонг и А. Пти обнаружили эмпирически, что действительно $C_V = 3R$ для большинства твердых тел при комнатной температуре, и приведенный выше результат получил в их честь название закона Дюлонга и Пти. Свой закон они сформулировали так: произведение теплоемкости химически простых тел на их атомные веса равно постоянной величине. Полученный результат можно обобщить на твердые химические соединения. Действительно, теорема Больцмана применима для любого химического элемента, входящего в химическое соединение. Внутренняя энергия химического соединения получается суммированием не только по степеням свободы, но и по атомам. Тогда для химического соединения, состоящего из n атомов $C_V = 3nR$.

Свои эксперименты Дюлонга и Пти проводили в очень узком диапазоне температур: 0 – 10 °С. Теоретическое обоснование закона Дюлонга и Пти стало возможным спустя более пятидесяти лет, после создания молекулярно-кинетической теории строения вещества. Однако закон Дюлонга и Пти нарушается, например, для бора, бериллия и углерода (в виде алмаза), для которых при комнатной температуре $C_V = 13,82, 16,08$ и $6,10$ Дж/(моль·К) соответственно. Более того, теплоемкости, всех твердых тел резко падают при низких температурах и стремятся к нулю, когда T приближается к 0 К.

Следует признать, что классическая теория теплоемкости кристаллов внутренне непоследовательна. В металлах ионная кристаллическая решетка заполнена идеальным электронным газом. Обладая тремя поступательными свободами, свободные электроны должны вносить вклад в теплоемкость кристалла. Опыт показывает, что этого не происходит. С развитием квантовой физики стали понятны ограничения, заложенные в классической теории теплоемкости металлов. Сначала квантовая теория теплоемкости Эйнштейна, а позднее квантовая теория теплоемкости Дебая полностью объяснили совокупность всех наблюдаемых экспериментальных фактов.

Приложение 2

Некоторые физические константы чистых металлов и латуни

Таблица

Атомная масса (A), плотность (ρ), температура плавления ($T_{пл}$), молярная (C_m) и удельная теплоемкость ($C_{уд}$), теплопроводность при 300 К (κ), температурный коэффициент сопротивления (α), температура Дебая ($T_{дб}$) некоторых металлов

Металл (хим. символ)	A , а.е.м.	ρ , г/см ³	$T_{пл}$, К	C_m , $\frac{Дж}{К \cdot \text{моль}}$	$C_{уд}$, $\frac{Дж}{К \cdot \text{кг}}$	κ , $\frac{Вт}{м \cdot К}$	$\alpha \cdot 10^{-3}$, град ⁻¹	$T_{дб}$, К
Алюминий (Al)	26,98	2,70	933,5	24,35	902,5	237	4,3	394
Латунь (Cu+Zn)	---	8,73	1205	-----	400	121	0,1-0,4	----
Железо (Fe)	55,85	7,87	1812	25,14	450	80,4	5,7	460
Вольфрам (W)	183,84	19,25	3695	24,27	132,4	162,8	4,4	310
Золото (Au)	196,97	19,30	1337,3	25,39	128,7	318,0	3,7	170
Медь (Cu)	63,55	8,92	1356,6	24,44	381	401	4,0	315
Молибден (Mo)	95,96	10,22	2896	23,93	244	138	4,6	450
Олово (Sn)	118,71	7,31	504,9	27,11	230	66,8	4,4	170
Платина (Pt)	195,08	21,45	2041,4	25,85	132,6	71,6	3,9	230
Свинец (Pb)	207,2	11,34	600,6	26,65	127,5	35,3	3,7	88
Серебро (Ag)	107,87	10,49	1235,1	25,36	235,4	429,0	3,8	225
Титан (Ti)	47,87	4,54	1943	25,1	530,8	21,9	--	380
Цинк (Zn)	65,38	7,13	692,65	25,4	453	116,0	4,2	234