

### Возможное решение Э-10-1

При комнатной температуре  $T_k$  определим с помощью омметра сопротивление терморезистора  $R_k = 10,3$  Ом. Заметим, что, при подключении к омметру терморезистор не греется. Так же определим сопротивление постоянного резистора  $r = 5,1$  Ом. При этих измерениях необходимо учитывать, что сопротивление подводящих проводов мультиметра около  $0,3$  Ом.

Подключим последовательно резистор, терморезистор, и батарейку. Терморезистор нагреется до некоторой установившейся температуры  $T_{уст}$ . В этом случае подводимая мощность равна мощности тепловых потерь. С помощью вольтметра находим напряжение на резисторе  $U_r$  и терморезисторе  $U_R$ . Считая, что мощность тепловых потерь пропорциональна разнице температур, находим коэффициент пропорциональности:

$$\alpha = \frac{P}{T_{уст} - T_k} = \frac{U_r U_R}{r} \cdot \left( -\frac{a}{\ln(R(T_{уст})/R_0)} \right) = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}.$$

Отключим терморезистор и будем измерять его сопротивление омметром, одновременно фиксируя время. Таким образом получим зависимость температуры от времени при охлаждении терморезистора. Для некоторой температуры терморезистора  $T$  запишем уравнение теплового баланса

$$-\alpha(T - T_k)\Delta\tau = C\Delta T,$$

где  $\Delta\tau$  — малый временной интервал, в течении которого мы рассматриваем процесс охлаждения терморезистора. Отношение малых приращений  $k = \Delta T/\Delta\tau$  есть коэффициент наклона касательной графика  $T(\tau)$  в точке с температурой  $T$ . Проведя на графике касательную и определив  $k$ , находим теплоёмкость

$$C = -\frac{\alpha(T - T_k)}{k} = 1,3 \text{ Дж/К}.$$

## Критерии оценивания Э-10-1

### Метод

1. Схема для измерений ..... 1 балл
2. Указаны значения  $T_0, R_0$  ..... 0,5 балла
3. Формула для вычисления теплоёмкости  $C$  для используемого метода ..... 1 балл
4. Учёт в методе (в формуле) потерь в окружающую среду ..... 3 балла
5. Метод позволяет найти  $C$  с достаточной точностью на данном оборудовании (например, метод проведения касательной в начале нагрева не подходит) ..... 1 балл

### Измерения

6. Проверено, что напряжение на клеммах источника в ходе нагрева меняется не сильно, и напряжение можно считать постоянным, или поправка на этот эффект ..... 1 балл
7. Учёт сопротивления проводов мультиметра  $\approx 0,3$  Ом) ..... 0,5 балла
8. Измерение зависимости напряжения на одном из резисторов от времени для нагрева ..... 0,7 балла
  - 5-9 точек ..... 0,4 балла
  - 10 и больше точек ..... 0,7 балла
  - ИЛИ измерено напряжение для установившегося режима ... 0,7 балла
9. Измерение зависимости сопротивления терморезистора от времени для охлаждения ..... 0,8 балла
  - 5-9 точек ..... 0,4 балла
  - 10 и больше точек ..... 0,8 балла

### Обработка результатов

10. Посчитано сопротивление терморезистора  $R$  для нагрева ..... 1 балл
11. Пересчитана температура на терморезисторе  $T$  для нагрева и для охлаждения ..... 0,5+0,5 балла
12. График (графики): подписаны оси и выбран масштаб ..... 0,5 балла
13. График (графики): нанесены точки из таблицы и проведена сглаживающая кривая ..... 0,5 балла
14. График (графики): проведение касательной и нахождение углового коэффициента ..... 0,5 балла

### Ответ

15. Значение теплоёмкости  $C = (1,30 \pm 0,25)$  Дж/К ..... 2 балла

## Возможное решение Э-10-2

Взвесим цилиндр из сухого льда, и затем измерим длину цилиндра. Методом прокатывания по линейке определим диаметр цилиндра. Так же можно уложить в ряд несколько одинаковых цилиндров (метод рядов). Положим на весы пластинку из пенопласта и проведём тарировку весов. Повторно взвесим цилиндр из сухого льда. Усредним массу цилиндра. Тогда вычисляем плотность сухого льда:  $\rho = 1,6 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$ .

Наполним стаканчик из теплоизолирующего материала сухим льдом. Поместим датчик электронного термометра в стаканчик. Прямыми измерениями определить температуру «сухого льда» не удаётся (минимально измеримая температура  $-75^\circ\text{C}$ ). Наливаем в одноразовый пластиковый стакан 30 мл воды (объем определяем на электронных весах) и измеряем температуру воды. Взвесим латунный цилиндр. Поместим его в стаканчик с сухим льдом (переносим цилиндр с помощью нити, привязанной к крючку цилиндра). Процесс охлаждения заканчивается с прекращением шипения содержимого стаканчика. Для надёжности выжидаем ещё минуту и переносим охлаждённый цилиндр в стакан с водой. Выжидая несколько минут до выравнивания температур воды и цилиндра, определяем установившуюся температуру. Решая уравнение теплового баланса находим температуру «сухого льда»:

$$t_x = t_{\text{уст}} - \frac{c_{\text{в}} m_{\text{в}}}{c_{\text{л}} m_{\text{л}}} (t_{\text{в}} - t_{\text{уст}}) = -73 \pm 3^\circ\text{C}.$$

Для определения теплоты сублимации сухого льда помещаем несколько граммов диоксида углерода в стаканчик с водой. Для обеспечения теплоизоляции одноразовый стакан помещаем в пенопластовый стакан. Сверху систему закрываем пенопластовой крышкой. После окончания процесса сублимации определяем температуру воды. Теплоту сублимации находим, решая уравнение теплового баланса:

$$q_{\text{субл}} = \frac{c_{\text{в}} m_{\text{в}}}{m_{\text{CO}_2}} (t_{\text{в}} - t_{\text{уст}}) = 600 \pm 10 \text{ кДж/кг}.$$

Для определения теплоемкости алюминия проведем эксперимент, аналогичный пункту 2, но с цилиндром из дюралюминия. Количество теплоты, необходимое для нагревания цилиндра до установившейся температуры  $Q = \frac{1}{2} \cdot (c(t_x) + c(t_{\text{уст}})) m_{\text{ал}} (t_{\text{уст}} - t_x)$ .

Подставив  $Q$  в уравнение теплового баланса, получаем

$$(t_x) = \frac{2c_{\text{в}} m_{\text{в}} (t_0 - t_{\text{уст}})}{m_{\text{ал}} (t_{\text{уст}} - t_x)} - c(t_{\text{уст}}) = 720 \pm 50 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

## Критерии оценивания Э-10-2

- Определение плотности кристаллов** ..... 3 балла
1. Метод ..... 1,5 балла
    - Точность не хуже авторского ..... 1,5 балла
    - Прочие методы ..... 0,5 балла
  2. Значение ..... 1 балл
    - $1,3 \div 1,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  ..... 1 балл
    - $1,1 \div 1,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  ..... 0,5 балла
  3. Погрешность (только если стоят баллы за метод) ..... 0,5 балла
- Определение температуры сухого льда** ..... 4 балла
4. Метод ..... 1,5 балла
    - Точность не хуже авторского ..... 1,5 балла
    - Прочие методы ..... 0,5 балла
  5. Измерения ..... 1 балл
    - Два или более ..... 1 балл
    - Только одно ..... 0,5 балла
  6. Значение ..... 1 балл
    - $-71 \div -76^\circ \text{C}$  ..... 1 балл
    - $-67 \div -78^\circ \text{C}$  ..... 0,5 балла
  7. Погрешность (только если стоят баллы за метод) ..... 0,5 балла
- Определение удельной теплоты сублимации** ..... 4 балла
8. Метод (если учитывался нагрев газа, то не более 1 балла) ..... 1,5 балла
    - Точность не хуже авторского ..... 1,5 балла
    - Прочие методы ..... 0,5 балла

9. Измерения ..... 1 балл
- Два или более ..... 1 балл
  - Только одно ..... 0,5 балла
10. Значение ..... 1 балл
- $570 \div 630$  кДж/кг ..... 1 балл
  - $550 \div 650$  кДж/кг ..... 0,5 балла
11. Погрешность (только если стоят баллы за метод) ..... 0,5 балла  
**Определение теплоемкости дюралюминия** ..... 4 балла
12. Метод ..... 1,5 балла
- Точность не хуже авторского ..... 1,5 балла
  - Прочие методы ..... 0,5 балла
13. Измерения ..... 1 балл
- Два или более ..... 1 балл
  - Только одно ..... 0,5 балла
14. Значение ..... 1 балл
- $670 \div 770$  ..... 1 балл
  - $620 \div 820$  ..... 0,5 балла
15. Погрешность (только если стоят баллы за метод) ..... 0,5 балла