

Задача 9-3. Опыты Джоуля

0. Уравнение закона сохранения энергии в данном случае имеет вид

$$c_0 m_0 \Delta t = mgh. \quad (1)$$

Из этого уравнения следует, что

$$c_0 = \frac{mgh}{m_0 \Delta t}. \quad (2)$$

1. Теплоемкость системы является аддитивной величиной, поэтому общую теплоемкость можно представить следующим образом

$$c_{Cu}(m_1 + m_2) + c_{Zn}m_3 + c_w m_0 = C_w M_0. \quad (3)$$

Тогда эффективная масса воды оказывается равной

$$\begin{aligned} M_0 &= \frac{c_{Cu}}{c_w}(m_1 + m_2) + \frac{c_{Zn}}{c_w}m_3 + m_0 = \\ &= 0,09512 \cdot (1655,0 + 969,9) + 0,09555 \cdot 254,85 + 6041,11 = 6315,14 \text{ г} \end{aligned} \quad (4)$$

2.1 Обратим внимание, что в данной серии экспериментов температура окружающего воздуха была выше, чем температура воды в баке, поэтому вода дополнительно получала теплоту от воздуха. При наличии теплообмена с воздухом уравнение теплового баланса имеет вид

$$C\Delta t_w = Q_0 + Q_1, \quad (5)$$

где C - общая теплоемкость бака с водой, $\Delta t_w^{(1)}$ - изменение температуры воды в опыте с вращением лопастей (первая строка в таблице), Q_0 - количество теплоты, выделившейся из-за вращения лопастей, Q_1 - количество теплоты, полученной посредством теплообмена с воздухом.

При отсутствии теплообмена воды бы нагрелась на величину Δt^* , которая определяется выражением

$$C\Delta t_w^* = Q_0 = C\Delta t_w^{(1)} - Q_1, \quad (6)$$

Разумно предположить, что величина Q_1 пропорциональна разности между средней температурой воздуха и средней температурой воды в ходе опыта

$$Q_1 = \gamma(t_{\text{возд}}^{(1)} - \bar{t}_{\text{воды}}^{(1)}). \quad (7)$$

Для определения коэффициента пропорциональности в этом выражении следует воспользоваться результатами опыта без вращения лопастей. В этом опыте уравнение теплового баланса имеет вид

$$C\Delta t_w^{(2)} = Q_1^{(2)} = \gamma(t_{\text{возд}}^{(2)} - \bar{t}_{\text{воды}}^{(2)}). \quad (8)$$

Следовательно, коэффициент теплопередачи равен

$$\gamma = \frac{C\Delta t_w^{(2)}}{(t_{\text{возд}}^{(2)} - \bar{t}_{\text{воды}}^{(2)})}. \quad (9)$$

Подставляя выражения (7) и (9) в формулу (6), получим

$$C\Delta t_w^* = Q_0 = C\Delta t_w^{(1)} - Q_1 = C\Delta t_w^{(1)} - \gamma(t_{\text{возд}}^{(1)} - \bar{t}_{\text{воды}}^{(1)}) = C\Delta t_w^{(1)} - \frac{C\Delta t_w^{(2)}}{(t_{\text{возд}}^{(2)} - \bar{t}_{\text{воды}}^{(2)})}(t_{\text{возд}}^{(1)} - \bar{t}_{\text{воды}}^{(1)}). \quad (10)$$

Таким образом, при отсутствии теплообмена вода бы нагрелась на

$$\begin{aligned} \Delta t_w^* &= \Delta t_w^{(1)} - \Delta t_w^{(2)} \frac{(t_{\text{возд}}^{(1)} - \bar{t}_{\text{воды}}^{(1)})}{(t_{\text{возд}}^{(2)} - \bar{t}_{\text{воды}}^{(2)})} = \\ &= (13,208 - 12,843) - (13,268 - 13,208) \frac{14,277 - \frac{13,208 + 12,843}{2}}{14,371 - \frac{13,268 + 13,208}{2}} = 0,298^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (11)$$

3.1 Приравнивая выражения для кинетической и потенциальной энергии, получим

$$mgh = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow g = \frac{v^2}{2h} = \frac{(2,420 \cdot 2,540)^2}{2 \cdot 0,00760 \cdot 2,540} \cdot 0,01 = 9,786 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \quad (12)$$

3.2 Наличие трения приводит к уменьшению эффективной массы грузов на величину Δm . Поэтому энергия, пошедшая на нагревание бака равна

$$E = (M_1 - \Delta m)gh = \frac{(26317,9 - 183,8)}{1000} \cdot 9,786 \cdot 31,927 = 8165,50 \text{ Дж}. \quad (13)$$

4. Подставляя все найденные величины в формулу для теплоемкости воды, получим

$$c_0 = \frac{E}{M_0 \Delta t^*} = \frac{8165,50 \text{ Дж}}{6315,14 \cdot 0,298^\circ\text{C}} = 4,336 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}. \quad (14)$$

Это и есть численное значение энергии в 1 калорию, выраженную в джоулях.

Для интереса, отметим, что без учета всех поправок прямой расчет по формуле 1 приводит к значению $c_0 = 3,58 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}.$