

Эквивалентность теплоты и работы. Механический эквивалент теплоты

Цель работы: Экспериментально проверить эквивалентность понятий теплоты и работы.

Приборы и оборудование:

1. Металлические цилиндры
2. Лента
3. Поддерживающий стержень, длиной 250 мм
4. Подставка - основание
5. Динамометр на 10 Н
6. Динамометр на 100 Н
7. Секундомер
8. Тиски
9. Универсальный зажим
10. Набор гирь
11. Термометр
12. Штангенциркуль

Идея метода

С точки зрения первого начала термодинамики количество теплоты и работа являются мерой изменения энергии системы, поэтому можно говорить об эквивалентности количества теплоты и работы.

В лабораторной работе используется установка, в которой на исследуемый металлический цилиндр намотана специальная лента, к концу которой подвешен груз (рис. 1). При вращении цилиндра происходит его движение относительно нити. За счет работы внешних сил из-за трения ленты о поверхность цилиндра происходит его нагревание. Механический эквивалент теплоты можно определить, зная совершенную механическую работу и выделившееся количество теплоты. Количество теплоты можно определить по изменению температуры, считая известной теплоемкость металлического цилиндра. В дальнейшем можно определять теплоемкости исследуемых веществ (алюминия, латуни и других), используя эквивалентность теплоты и работы.

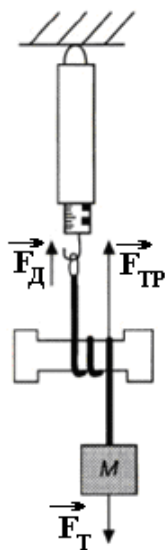


Рис.1. Силы, действующие на цилиндр при вращении

Если при вращении рукоятки груз M (см. рис. 1) сохраняет состояние покоя, то сила тяжести груза $F_T = Mg$ (M – масса гири, g – ускорение свободного падения) должна уравновешиваться силами натяжения F_D и трения скольжения $F_{ТР}$.

$$\vec{F}_T + \vec{F}_D + \vec{F}_{ТР} = 0 \quad (2)$$

В проекции на вертикальную ось

$$F_{ТР} = F_T - F_D \quad (3)$$

Работу силы трения A , действующей на перемещении, равном $s = 2\pi \cdot r \cdot N$ (где r – радиус цилиндра, N – число оборотов) можно рассчитать как

$$A = 2\pi \cdot r \cdot N \cdot F_{ТР} = 2\pi \cdot r \cdot N \cdot (F_T - F_D) \quad (4)$$

При скольжении ленты по поверхности цилиндра большая часть механической работы A превращается в тепловую энергию Q вследствие неупругой деформации ленты. Если при этом температура цилиндра возрастает на величину ΔT , то в соответствии с первым началом термодинамики (1):

$$A = \Delta U = c_v \cdot \Delta T = C_{сум} \cdot \Delta T = Q, \quad (5)$$

где c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме; $C_{сум}$ – суммарная теплоемкость нагреваемых частей установки; Q – количество теплоты, которое необходимо передать системе для увеличения ее температуры на ΔT . Суммарная теплоемкость складывается из:

- теплоемкости цилиндра $C_{цил}$, масса которого m , удельная теплоемкость c

$$C_{цил} = c \cdot m \quad (6)$$
- теплоемкости ленты C_L , $C_L = 4$ Дж/К;
- теплоемкости термометра C_T , $C_T = 4$ Дж/К (или теплоемкости термодатчика $C_T = 10$ Дж/К).

Считая известной теплоемкость цилиндра, можно найти количество теплоты, переданное цилиндру Q , и тем самым определить механический эквивалент теплоты, то есть проверить выполнение равенства $A = Q$.

Если теплоемкость цилиндра неизвестна, то ее можно найти, используя эквивалентность теплоты и работы.

Выражение для суммарной теплоемкости примет вид

$$C_{сум} = C_{цил} + C_L + C_T \quad (7)$$

Тогда теплоемкость исследуемого металла, учитывая соотношения (5)-(7), можно рассчитать как

$$C_{цил} = \left(\frac{A}{\Delta T} - C_L - C_T \right). \quad (8)$$

Теплоемкости опоры и проводящей пасты пренебрежимо малы, поэтому не учитываются при проведении расчетов.

Для увеличения точности измерения температуры лучше проводить автоматически.

Для определения разности температур ΔT рекомендуется построить график зависимости температуры цилиндра от времени $T(t)$. На рис. 2 представлен примерный вид графика зависимости $T(t)$. Вид графика свидетельствует о том, что пока вращают рукоятку, цилиндр нагревается, а после прекращения вращения тепловая энергия непрерывно выделяется в окружающую среду.

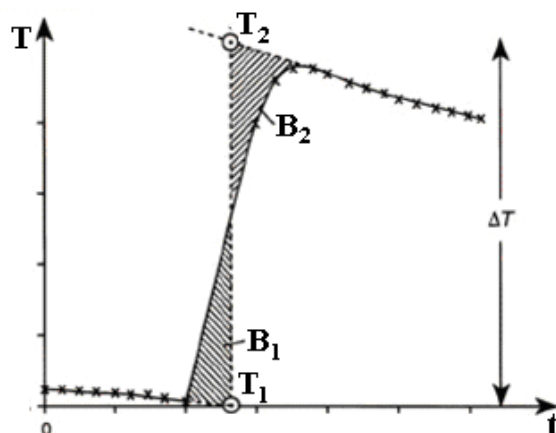


Рис.2. Примерный вид графика зависимости температуры от времени

Так как нагрев цилиндра происходит не мгновенно, и цилиндр не теплоизолирован, то в процессе его нагревания будут иметь место потери энергии из-за теплообмена с окружающей средой. Для того чтобы это учесть для определения ΔT используют следующий метод. Экстраполируют левый и правый прямолинейные участки графиков зависимости температуры от времени так, как показано на рис. 2. Затем проводят вертикальную линию, параллельно оси температур таким образом, чтобы получились две равные по площади части B_1 и B_2 . Разность ординат $T_2 - T_1$ для точек пересечения экстраполированных прямых линий с построенной вертикальной прямой и будет равняться искомой разности температур ΔT .

Проверка эквивалентности теплоты и работы

(рекомендуется проводить с маленьким латунным цилиндром)

1. Соберите установку в соответствии с рис. 3.

Внимание: перед началом измерений убедитесь, что цилиндр и рукоятка надежно зафиксированы на опоре, а основание опоры надежно прикреплено к столешнице винтами. Ненадежное крепление может привести к тому, что основание при вращении рукоятки не удержится на столе, упадет, что может привести к травме и повреждению термометра.



Рис.3 Схема установки для проведения измерений.

2. Перед началом измерений металлический цилиндр и ленту необходимо протереть сухой тканью, чтобы очистить их поверхности.

3. С помощью штангенциркуля определите диаметр и рассчитайте радиус r выбранного цилиндра. Запишите полученное значение.
4. С помощью динамометра на 100 Н взвесьте цилиндр и рассчитайте его массу m . Запишите полученное значение.
5. Закрепите цилиндр на подставке (рис. 3).
6. Специальную синтетическую ленту прикрепите к динамометру и намотайте так, чтобы она сделала 2,5 оборота вокруг металлического цилиндра (рис. 1). Такой способ намотки обеспечивает равновесие динамометра при вращении рукоятки по часовой стрелке.
7. Прикрепите гирию к нижнему концу ленты.

Внимание: при использовании алюминиевого цилиндра трение не должно превышать 10 Н. Для этого используют килограммовую гирию и динамометр на 10 Н. Делается это для того, чтобы избежать механического повреждения поверхности цилиндра из-за трения и повреждения ленты. При использовании других цилиндров используется динамометр на 100 Н и гири массой до 5 кг.

8. Для измерения температуры используется термометр. Он удерживается с помощью специального зажимного устройства и аккуратно вставляется в отверстие, просверленное в металлическом цилиндре. Термометр и отверстие в цилиндре должны быть точно установлены на одной прямой, чтобы термометр не сломался при вращении цилиндра. Для улучшения теплового контакта отверстие в цилиндре заполняется теплопроводящей пастой.
9. В начале измерений температура T фиксируется каждые 30 секунд в течение первых четырех минут.
10. Затем необходимо начать быстро и равномерно вращать рукоятку, сделав это определенное число раз (не менее 200 раз). Запишите число оборотов N в лабораторный журнал.

Внимание: Рукоятку следует вращать только по часовой стрелке.

В процессе вращения рукоятки необходимо с помощью динамометра определить силу натяжения F_d и записать это значение.

Если измерения проводятся вручную, необходимо зафиксировать время начала и окончания вращения.

11. После прекращения вращения значения температуры снова фиксируются через каждые 30 секунд. На этой стадии измерений температура медленно убывает (рис. 2). Результаты измерений занесите в таблицу.
12. По данным измерений (если измерений проводились вручную) постройте график зависимости температуры T от времени t .
13. По графику зависимости температуры T от времени t определите $\Delta T = T_2 - T_1$ как показано на рис.2.
14. Рассчитайте количество теплоты, полученное цилиндром по формулам (5)-(7), используя при расчетах теплоемкости табличное значение удельной теплоемкости выбранного цилиндра, его массу m и графически определенное значение ΔT .
15. Рассчитайте работу силы трения, используя соотношение (4).
16. Сравните полученное цилиндром количество теплоты и работу силы трения и сделайте вывод.
17. Рассчитайте механический эквивалент теплоты по данным своих измерений.

Табличные значения удельных теплоемкостей:

$$c_{\text{алюминия}} = 902 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

$$c_{\text{латуни}} = 386 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$