



Задача 9-3. Опыты Джоуля

Долгое время (более 200 лет с начала ее изучения) природа теплоты была не известна. Основной теорией теплоты являлась теория *теплорода*. Согласно этой теории теплота есть некая невесомая жидкость, заполняющая все нагретые тела; передача теплоты есть простое перетекание теплорода из одного тела к другому и т.д.

Только в середине XIX века утвердилась «механическая теория теплоты» согласно этой теории теплота (точнее, тепловая или внутренняя энергия) есть кинетическая энергия движения молекул и потенциальная энергия их взаимодействия.

Важнейшую роль в развитии механической теории теплоты сыграли тщательные эксперименты, выполненные английским физиком Дж. П. Джоулем, результаты которых были опубликованы в 1847 году. Основная цель этих экспериментов – измерение, так называемого, *механического эквивалента теплоты*.

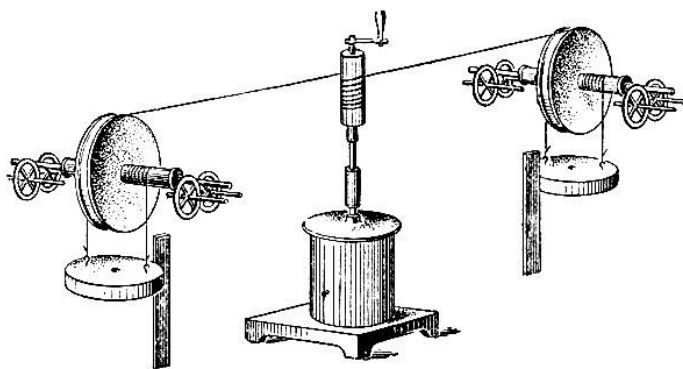
Еще когда природа теплоты была неизвестна, для ее измерения была введена специальная единица измерения – калория, количество теплоты которое требуется для нагревания 1 грамма воды на 1 градус Цельсия. Следовательно, теплоемкость воды равна

$c_0 = 1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$ (точно, по определению). Но так, как теплота есть мера энергии, то она должна

измеряться в единицах измерения энергии и работы (в системе СИ – это Джоуль). Таким образом, основной задачей Дж. П. Джоуля являлось установление количественного соотношения между единицей теплоты *калорией* и единицей механической энергии *Джоулем*².

Схема установки Джоуля показана на рисунке. В медном баке с водой находилась система латунных лопастей, которые приводились во вращение с помощью системы опускающихся грузов, нитей и блоков.

Высота, с которой опускались грузы, их масса легко измеряемы. Также тщательно измерялось изменение температуры воды из-за вязкого трения лопастей. По этим экспериментальным данным можно рассчитать искомую величину механического эквивалента теплоты.



0. Пусть грузы общей массы m опустились на высоту h , при этом вода массы m_0 нагрелась на Δt градусов Цельсия. Пренебрегая всеми теплоты и механической энергии, получите формулу для удельной теплоемкости воды c_0 , выраженной в единицах механической энергии.

² Конечно, сам Дж. П. Джоуль использовал английскую систему мер. Так механическую работу он измерял в футо-фунтах – энергия которая требуется, чтобы поднять 1 фунт на высоту в 1 фут, температура измерялась в градусах Фаренгейта, масса измерялась в гранах и т.д. Для упрощения вашей работы все численные данные, приведенные в условии данной задачи (взяты непосредственно из работы Дж. П. Джоуля) переведены в привычные для вас единицы измерения.

Однако такой подход приводит к слишком большим систематическим ошибкам. Дж. П. Джоуль был великолепным экспериментатором, поэтому в своей работе он учел многочисленные поправки, рассчитать которые по данным Дж. П. Джоуля предстоит и вам. Вопросы задачи выделены рамками. В ответе на каждый вопрос приведите расчетную формулу и численный результат с необходимым числом значащих цифр.

1. Теплоемкость системы.

Масса медного бака $m_1 = 1655,0 \text{ г}$. Лопастей состоят из латуни (сплава меди и цинка) и содержат $m_2 = 969,90 \text{ г}$ меди и $m_3 = 254,85 \text{ г}$ цинка. Масса воды в баке $m_0 = 6041,11 \text{ г}$. Отношение удельной теплоемкости меди к удельной теплоемкости воды равно

$$\frac{c_{Cu}}{c_w} = 0,09512, \text{ а отношение удельной теплоемкости цинка к удельной теплоемкости воды}$$

$$\frac{c_{Zn}}{c_w} = 0,09555.$$

1. Найдите эффективную массу воды M_0 , то есть массу воды, которая имеет такую же теплоемкость, как теплоемкость бака с водой и лопастями.

2. Нагрев воды и теплообмен с окружающей средой.

Процитируем работу Дж. П. Джоуля. *Метод проведения опытов состоял в следующем. Определялась температура прибора трения³, грузы удерживались в подвешенном состоянии, ... определялось точное положение грузов над землей, вал освобождался и ему давали возможность вращаться до тех пор, пока грузы не достигали вымощенного плитам пола лаборатории, опускаясь примерно на 63 дюйма. ... После того, как эта процедура повторялась **20 раз**, эксперимент завершался новым наблюдением температуры прибора. Средняя температура лаборатории определялась в начале, середине и при завершении каждого эксперимента. Непосредственно перед каждым опытом или сразу после него я проводил проверку воздействия передачи теплоты телу из атмосферы, или в обратном направлении... При этих проверках положение аппарата, количество содержащейся в нем воды, **время проверки**, метод наблюдения термометров, положение экспериментатора – короче говоря, все условия, за исключением того, что аппарат покоился, были такими же, как и в экспериментах, в которых наблюдался эффект трения.*

Результаты одной из серий экспериментов приведены в Таблице 1. Все температуры приведены в градусах Цельсия

Эксперимент	Общая высота опускания грузов (м)	Средняя температура воздуха	Температура прибора в начале опыта	Температура прибора в конце опыта
С вращением	31,927	14,277	12,843	13,208
Без вращения	0	14,371	13,208	13,268

2.1 Рассчитайте по этим данным, на сколько градусов нагрелась бы вода, если бы не было теплообмена с окружающей средой.

³ Имеется в виду бака с водой.

3. Ускорение свободного падения и потери механической энергии.

По утверждению Дж. П. Джоуля кинетическая энергия тела, движущегося со скоростью $v = 2,420 \frac{\text{дюйм}}{\text{с}}$, равна потенциальной энергии того же тела, поднятого на высоту $h = 0,00760 \text{ дюйм}$.

3.1 Рассчитайте по этим данным ускорение свободного падения в лаборатории. ($1 \text{ дюйм} = 2,540 \text{ см}$).

Общая масса опускающихся грузов равна $M_1 = 26317,9 \text{ г}$. Для учета сил трения в осях блоков и оси вала были проведены дополнительные измерения. Если отсоединить лопасти, то для того, чтобы грузы пришли в движение на один из них необходимо положить дополнительный перегрузок массы $\Delta m = 183,8 \text{ г}$.

3.2 Найдите механическую энергию (в Джоулях) опускающихся грузов, пошедшую на нагревания бака с водой.

4. Механический эквивалент теплоты.

4. Используя все приведенные и полученные вами данные, рассчитайте, чему равна 1 калория в Джоулях.