

Теплоемкость идеального газа

А. ШЕРОНОВ

ИЗМЕНЕНИЕ температуры физического объекта (твердого тела, жидкости, газа и т.п.) в процессе подвода или отвода тепла характеризуется теплоемкостью данного тела. Величина теплоемкости может при этом зависеть от температуры тела, объема, от агрегатного состояния, а в ходе процесса теплопередачи теплоемкость может даже менять знак. Поэтому величина теплоемкости C определяется отношением количества теплоты Q , подведенного к телу (или отведенного от него) при бесконечно малом изменении ΔT его температуры, к этому изменению:

$$Q = C\Delta T.$$

Первое начало термодинамики позволяет записать это соотношение в виде

$$C\Delta T = \Delta U + p\Delta V,$$

где ΔU — изменение внутренней энергии тела, а $p\Delta V$ (p — давление, ΔV — малое изменение объема) — работа, совершенная телом при подводе к нему количества теплоты Q .

В природе и в технических устройствах довольно часто встречаются процессы, в ходе которых теплоемкость остается постоянной величиной (такие процессы называются политропическими). Так например, в изотермическом процессе температура не меняется ($\Delta T = 0$), а тепло подводится ($Q \neq 0$), поэтому теплоемкость бесконечно большая величина. В адиабатическом процессе $Q = 0$, а $\Delta T \neq 0$, поэтому теплоемкость равна нулю. В изохорическом процессе $\Delta V = 0$, т.е. работа не совершается, и теплоемкость при постоянном объеме C_V характеризует изменение внутренней энергии тела. Для одноатомного идеального газа подвод тепла увеличивает кинетическую энергию хаотического движения его атомов. Изменение внутренней энергии при этом составляет $\Delta U = C_V\Delta T$, а соответствующая молярная теплоемкость равна $C_V = 3/2R$, где R — универсальная газовая постоянная. Для двухатомного идеального газа изменяется также энергия вращательного движения молекул, что приводит к увеличению теплоемкости

— молярная теплоемкость равна $C_V = 5/2R$. В случае твердых кристаллических тел (металлы, диэлектрики, полупроводники) изменяется энергия колебательного движения (кинетическая и потенциальная) атомов относительно их равновесных положений в кристаллической структуре. Для большинства твердых тел при комнатной температуре ($T \approx 300$ К) молярная теплоемкость близка к $3R$.

Заметим, что теплоемкость, приводимая в справочниках, обычно измерена в изобарическом процессе, т.е. при постоянном внешнем давлении. Подведенное тепло в этом случае идет на изменение внутренней энергии ΔU и совершение работы $p\Delta V$. Для твердых тел и жидкостей изменение внутренней энергии намного больше, чем совершаемая при этом работа, поэтому для твердых тел и жидкостей теплоемкости C_V (теплоемкость при постоянном объеме) и C_p (теплоемкость при постоянном давлении) мало отличаются по величине, в то время как для газов это отличие существенно.

Перейдем теперь к рассмотрению примеров использования понятия теплоемкости при решении конкретных задач.

Задача 1. В комнате объемом $V = 60$ м³ находится воздух при давлении $p = 10^5$ Па и температуре $T = 300$ К. На сколько градусов изменится температура воздуха в комнате за час работы в ней нагревателя мощностью 1 кВт? Считать, что воздух прогревается равномерно и из комнаты не выходит, а передача тепла от него окружающим телам мала.

Воздух можно считать двухатомным идеальным газом с молярной теплоемкостью $C_V = 5/2R = 20,7$ Дж/моль. В комнате находится $\nu = pV/(RT)$ моль воздуха. За час работы нагревателя выделяется количество теплоты $Q = 3,6 \cdot 10^6$ Дж. Следовательно, изменение температуры составит

$$\Delta T = \frac{Q}{\nu C_V} = \frac{QRT}{C_V pV} = 70 \text{ К.}$$

Полученный результат явно превосходит реальный нагрев воздуха в ком-

нате при данной мощности нагревателя. Это означает, что передачей тепла от воздуха окружающим телам пренебречь нельзя — грубая оценка.

Задача 2. В установке для измерения теплоемкостей газов исследуемый газ под небольшим избыточным давлением прокачивается через трубку, внутри которой находится нагреватель известной мощности. Измеряется разность температур газа на входе и выходе трубки и количество газа, прошедшего через трубку в единицу времени. Считая, что все тепло, выделяемое нагревателем, передается газу, найдите величину теплоемкости, измеряемой в этом опыте. На сколько измеренная теплоемкость отличается от теплоемкости при постоянном объеме?

Пусть в стационарном режиме в единицу времени на вход в трубку поступает 1 моль газа. Обозначим давление газа на входе через p_1 , а температуру через T_1 . Работа, совершенная компрессором над газом, будет равна $p_1V_1 = RT_1$. На выходе эта порция газа совершит работу против внешнего давления, равную $p_2V_2 = RT_2$, где p_2 — внешнее давление, а T_2 — температура газа на выходе. Используя первое начало термодинамики, можно записать

$$Q = C_V(T_2 - T_1) + p_1V_1 - p_2V_2 = C_V\Delta T + R\Delta T = C_p\Delta T,$$

где Q — подведенное к 1 молю газа количество теплоты. Мы получили, что в данном опыте измеряется теплоемкость при постоянном давлении, которая отличается от теплоемкости при постоянном объеме на R .

При решении мы нигде не использовали малость разности давлений на концах трубки. Значит ли это, что полученный результат будет справедливым и при больших перепадах давления? Нет, не значит, поскольку в этом случае при написании энергетического баланса мы не можем пренебрегать кинетической энергией поступательного движения газа.

Задача 3. Моль гелия сжимают в процессе с постоянным давлением 1—2 (рис. 1) так, что $T_1 = 8T_2$. Затем газ расширяется в процессе 2—3 с постоянной теплоемкостью до первоначального объема. Найдите эту теплоемкость, если конечная температура T_3 в 16 раз меньше начальной T_1 , а работа по сжатию в 14/3 раза больше работы по расширению.

Работа по сжатию равна

$$A_{12} = p_1(V_1 - V_2) = R(T_1 - T_2) = 7RT_2.$$