

Еськов Максим Исидорович

Учитель физики ГОУ СОШ № 85 СЗАО г. Москвы.

Применение первого начала термодинамики к изобарному процессу идеального газа

В статье рассматриваются общие положения расчёта макропараметров термодинамического процесса в идеальном газе при постоянном давлении, получены расчётные формулы для определения количества теплоты, изменения внутренней энергии и работы. Приведены примеры решения задач, начиная с элементарных и заканчивая более сложными.

Человечество использует взаимосвязь теплоты и работы с эпохи позднего палеолита. Именно тогда люди научились добывать огонь, причём оба известных истории способа (трение и удар) основаны на увеличении внутренней энергии тела при совершении работы над ним. При этом происходит выделение тепла, сопровождающееся увеличением температуры легковоспламеняющихся веществ (таких, как сухие листья, мхи, хвоя и т. д.) выше температуры их загорания. Однако лишь в 1798 году английский физик В. Румфорд, изучая явления, происходящие при сверлении пушечных стволов, применил научный подход к явлению выделения тепла при совершении работы. Стало ясно, что нагреть тело можно не только при

помощи теплообмена, но и совершая работу над ним.



Первое начало термодинамики устанавливает количественное соотношение между работой, совер-

шённой над телом (или наоборот, совершённой самим телом), количеством поглощённой (или наоборот, выделенной) им теплоты и изменением внутренней энергии тела.



Первое начало термодинамики:
Количество теплоты, сообщённое системе, идёт на изменение внутренней энергии системы и на совершение работы:

$$Q = \Delta U + A.$$

Если у системы отбирается количество теплоты и (или) над системой совершают работу внешние силы, то перед количеством теплоты и работой ставится знак минус.

Ниже мы будем рассматривать первое начало термодинамики только лишь применительно к идеальному газу. В этом (и только в этом) случае развёрнутая запись первого начала имеет относительно простой вид. Это связано с тем,

что в модели идеального газа его внутренняя энергия зависит только от температуры и не зависит от объёма газа, что не является верным для прочих термодинамических систем (например для жидкости или твёрдого тела).

Применение первого начала термодинамики к изобарному процессу представляется наиболее интересным по той причине, что изобарный процесс является единственным из изопроцессов, в котором первое начало представлено в полном виде. Во всех остальных изопроцессах одно из слагаемых первого начала отсутствует. Рассмотрим более конкретно.

1. В изотермическом процессе изменение внутренней энергии равно нулю, так как температура неизменна и $\Delta U = 0$. Первое начало имеет вид: $\Delta U = A$.

2. В изохорном процессе работа не совершается: $A = 0$, так как объём неизменен ($\Delta V = 0$). Первое начало имеет вид: $Q = \Delta U$.

3. В адиабатном процессе нет теплообмена и $Q = 0$. Первое начало имеет вид: $\Delta U = -A$.

И только в изобарном процессе имеют место все изменения, отражённые в первом начале термодинамики: изменяется внутренняя энергия, совершается работа и имеет место теплообмен: $Q = \Delta U + A$.

Казалось бы, что расчёты для изобарного процесса наиболее сложны, однако это не совсем так. Именно изобарный процесс позволяет унифицировать расчёт, сведя его к минимальному количеству данных.

Действительно, для идеального газа внутренняя энергия рассчитывается по формуле:

$$U = \frac{i}{2} \nu RT, \quad (1)$$

где i – число степеней свободы.

Напомним, что под степенью свободы понимается число независимых движений, в которых одновременно может участвовать молекула. Число степеней свободы для одноатомного идеального газа равно 3, так как его молекулы – материальные точки – могут двигаться только поступательно (вдоль трёх осей координат). В двухатомных молекулах добавляются ещё две вращательные степени свободы (две, а не три потому, что вращение вдоль оси, соединяющей атомы в молекуле, не вносит вклад в её кинетическую энергию). Таким образом, для двухатомного идеального газа $i=5$. В трёхатомных молекулах $i=6$ (3 поступательные и 3 вращательные степени свободы). Исключение для трёхатомных молекул составляет углекислый газ (CO_2), для которого $i=5$, как и для двухатомного, потому что молекула CO_2 имеет линейное расположение атомов.

Работа в изобарном процессе рассчитывается следующим образом: $A = p\Delta V = \nu R\Delta T$. Поясним, как получена эта формула. Для этого рассмотрим процесс изобарного расширения идеального газа, показанный на (p, V) -диаграмме ниже (рис. 1).

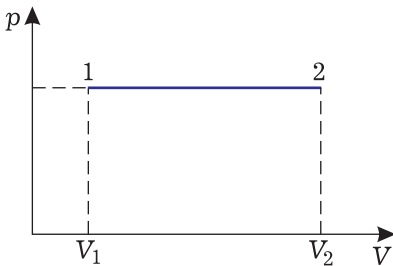


Рис. 1

Здесь давление газа в течение всего процесса одинаково и равно p .

Объём и температура в начале и в конце процесса V_1, T_1 и V_2, T_2 соответственно. Запишем уравнения Клапейрона–Менделеева для начального и конечного состояний газа:

$$pV_1 = \nu RT_1,$$

$$pV_2 = \nu RT_2.$$

Вычтем первое уравнение из второго:

$$p(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1).$$

Здесь в левой части уравнения получилось известное выражение для работы в изобарном процессе $A = p\Delta V$. Значит:

$$A = \nu R\Delta T. \quad (2)$$

Записывая первое начало для изобарного процесса с учётом формул (1) и (2), получаем:

$$Q = \frac{i}{2}\nu R\Delta T + \nu R\Delta T = \frac{i+2}{2}\nu R\Delta T.$$

Таким образом, значения основных термодинамических величин для изобарного процесса в идеальном газе выглядят следующим образом:

$$\Delta U = \frac{i}{2}\nu R\Delta T, \quad A = \nu R\Delta T,$$

$$Q = \frac{i+2}{2}\nu R\Delta T = \frac{i+2}{2}A.$$

Задача 1. Гелий при изобарном расширении совершает работу 4000 Дж. Какое количество теплоты получил гелий?

Решение. Гелий – одноатомный газ. Значит, число степеней свободы $i=3$. Тогда получаем:

$$Q = \frac{3+2}{2} \cdot 4000 \text{ Дж} =$$

$$= 10000 \text{ Дж} = 10 \text{ кДж}.$$

Таким образом, количество теплоты, сообщённое гелию, $Q=10$ кДж.

Задача 2. Углекислый газ изобарно нагрели на $\Delta T=200$ К. Какое количество теплоты получил углекислый газ, какую работу он при этом совершил и как изменилась его

внутренняя энергия, если газ взят в количестве $m = 88$ г?

Решение. Углекислый газ — трёхатомный газ, однако молекула CO_2 линейна. Значит, число степеней свободы $i = 5$. Найдём количество вещества. Молярная масса углекислого газа $\mu = 44$ г/моль. Тогда

количество вещества $\nu = \frac{m}{\mu} = 2$ моль.

Теперь находим искомые величины: $A = \nu R \Delta T = 2 \text{ моль} \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \times 200 \text{ К} = 3324 \text{ Дж}$; $\Delta U = 5/2 A$; $\Delta U = 8310 \text{ Дж}$. Тогда количество теплоты $Q = 11634 \text{ Дж}$.

Задача 3. В цилиндре при температуре 20°C находится $m = 2$ кг



воздуха. Какова будет работа при его изобарном нагревании на 100°C ? Молярная масса воздуха 29 г/моль.

Решение. Работа идеального газа при изобарном расширении рассчитывается следующим образом: $A = \nu R \Delta T = \frac{m}{\mu} R \Delta T$. В условии задачи все необходимые данные есть. Подставляя их значения, получаем:

$$A = \frac{2 \text{ кг}}{0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 100 \text{ К} \approx 57000 \text{ Дж}.$$

Итак, совершённая при этих условиях работа составит 57 кДж.

Задача 4. В цилиндре заключено $1,6$ кг кислорода при температуре 17°C . До какой температуры нужно изобарно нагреть кислород, чтобы работа по его расширению была равна $5 \cdot 10^4$ Дж?

Решение. Искомое значение температуры будет равно сумме начальной температуры и её изменения при изобарном расширении. Изменение температуры при изобарном расширении кислорода найдём из значения совершённой при этом работы:

$$A = \nu R \Delta T = \frac{m}{\mu} R \Delta T,$$

отсюда

$$\Delta T = \frac{\mu A}{m R}.$$

Молярная масса кислорода равна $0,032$ кг/моль. Подставляя это значение, а также данные условия задачи, получаем:

$$\Delta T = \frac{0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 5 \cdot 10^4 \text{ Дж}}{1,6 \text{ кг} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} \approx 120 \text{ К}.$$

Следует вспомнить, что изменение температуры в абсолютной термодинамической шкале и в шкале Цельсия одинаковы. Тогда получаем искомую температуру:

$$t_{\text{кон}} = t_{\text{нач}} + \Delta T;$$

$$t_{\text{кон}} = 17^\circ\text{C} + 120^\circ\text{C} = 137^\circ\text{C}.$$

Окончательный ответ: кислород надо нагреть до 137°C .

Задача 5. В вертикальном неподвижном теплоизолированном цилиндрическом сосуде с площадью поперечного сечения S под поршнем

массы M содержится некоторое количество одноатомного идеального газа (рис. 2). В некоторый момент времени под поршнем включают нагреватель, передающий газу за единицу времени количество теплоты q . Атмосферное давление равно p_0 . Определите установившуюся скорость v перемещения поршня, считая расширение газа изобарным, а потери на трение и нагрев цилиндра и поршня пренебрежимо малыми.

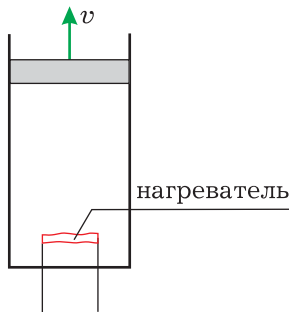


Рис. 2

Решение. Скорость движения поршня установится при равенстве силы давления со стороны нагреваемого газа под поршнем и сил тя-

жести и атмосферного давления над поршнем:

$$pS = Mg + p_0S.$$

В изобарном процессе одноатомного идеального газа количество теплоты $Q = qt = \frac{5}{2}\nu R\Delta T$. С другой стороны, работа одноатомного идеального газа в изобарном процессе

$$A = p\Delta V = pS\Delta h = \nu R\Delta T.$$

Таким образом, $pS\Delta h = \nu R\Delta T$.

Подставляя это соотношение в значение количества теплоты, получаем:

$$Q = \frac{5}{2}pS\Delta h = qt \Rightarrow pS = \frac{2qt}{5\Delta h} = \frac{2q}{5v},$$

так как $v = \frac{\Delta h}{t}$. Подставляя полу-

ченное значение силы давления со стороны газа в исходное соотношение, получаем:

$$pS = \frac{2q}{5v} = Mg + p_0S \Rightarrow v = \frac{2q}{5(Mg + p_0S)}.$$

Итак, окончательно установившееся значение скорости в указанном изобарном процессе $v = \frac{2q}{5(Mg + p_0S)}$.

Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор

Надёжная опора

– Осторожно, осторожно, не упади, – предостерегает мама спускающегося по лестнице мальчика с тарелкой супа в руках.

– Да не упаду я – за тарелку я держусь крепко!

Нужное условие полёта

Садясь в самолёт, две женщины задержались у трапа и попросили пилота:

– Пожалуйста, не летите быстрее звука. Мы хотим по дороге поговорить друг с другом.