

§ 14. Первый закон термодинамики.

Применение первого закона термодинамики к изопроцессам изменения состояния идеального газа

В 9-м классе вы узнали, что полная механическая энергия замкнутой системы тел сохраняется только при отсутствии трения, а при наличии трения она уменьшается. Куда девается механическая энергия?

Закон сохранения энергии. В середине XIX в. известный английский физик Дж. Джоуль (1818–1889), проведя многочисленные опыты, показал, что совершённая при перемешивании воды механическая работа практически равна увеличению её внутренней энергии. Опыты Джоуля, а также исследования немецкого врача и естествоиспытателя Р. Майера (1814–1878), немецкого профессора физиологии и одного из самых знаменитых физиков второй половины XIX в. Г. Гельмгольца (1821–1894) позволили сформулировать *закон сохранения и превращения энергии*, распространив его на все явления природы.

Закон сохранения и превращения энергии: при любых взаимодействиях материальных объектов энергия не исчезает и не возникает из ничего, она только передаётся от одних объектов к другим или превращается из одной формы в другую.

Закон сохранения и превращения энергии является всеобщим законом природы и связывает воедино все физические явления. Этот закон выполняется абсолютно точно, на нём базируется всё современное естествознание.

От теории к практике

Если бутылку, заполненную до половины водой при комнатной температуре, встряхивать в течение нескольких минут, то окажется, что вода нагрелась на 1–2 °С. Что является причиной повышения температуры воды?

Первый закон термодинамики. В предыдущих параграфах мы рассматривали процессы, в которых внутренняя энергия системы изменялась или при совершении работы, или в результате теплообмена. Однако чаще всего при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется как за счёт совершения работы, так и за счёт теплообмена с окружающими телами.

Для термодинамических систем закон сохранения и превращения энергии называют *первым законом термодинамики*.

Первый закон термодинамики: приращение внутренней энергии термодинамической системы при переходе из одного состояния в другое равно алгебраической сумме работы, совершённой внешними силами, и количества теплоты, полученного (или отданного) системой при взаимодействии с внешними телами.

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

Поскольку работа внешних сил равна работе, совершаемой термодинамической системой, взятой с противоположным знаком ($A' = -A$), то *первый закон термодинамики* можно сформулировать иначе:

Количество теплоты, полученное (или отданное) термодинамической системой при взаимодействии с внешними телами при её переходе из одного состояния в другое, идёт на приращение внутренней энергии системы и на работу, которую она совершает против внешних сил:

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

От теории к практике

Идеальный газ получил количество теплоты $Q = 340$ Дж. Каково приращение внутренней энергии газа, если при этом сила давления газа совершила работу $A = 300$ Дж?

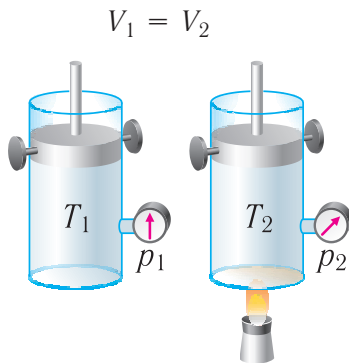


Рис. 78

Применим первый закон термодинамики к различным изопроцессам изменения состояния идеального одноатомного газа.

Рассмотрим в качестве термодинамической системы идеальный одноатомный газ, находящийся в цилиндрическом сосуде, закрытом поршнем.

Изохорный процесс. Если сосуд закрыт неподвижным поршнем, то при нагревании объём газа остаётся постоянным ($V = \text{const}$ и $\Delta V = 0$) (рис. 78). Следовательно, работа силы давления газа $A = 0$. Тогда первый закон термодинамики примет вид:

$$Q = \Delta U.$$



При изохорном процессе всё передаваемое газу количество теплоты идёт на увеличение его внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T > 0.$$

Если газ при изохорном процессе отдаёт количество теплоты, то его внутренняя энергия убывает: $\Delta U < 0$.

От теории к практике

Каково приращение внутренней энергии идеального газа, если при изохорном процессе от него было отведено количество теплоты $Q = -560$ Дж?



Изотермический процесс. Поместим сосуд с газом, находящимся под подвижным поршнем, в термостат — устройство, в котором поддерживается постоянная температура (рис. 79). С помощью внешнего устройства медленно переместим поршень в сосуде так, чтобы объём газа увеличился (или уменьшился). Значения температуры газа в начальном и конечном состояниях одинаковы. В этом случае внутренняя энергия идеального одноатомного газа $U = \frac{3}{2} \nu RT$ остаётся постоянной, а её изменение $\Delta U = 0$. Тогда первый закон термодинамики примет вид:

$$Q = A.$$

При изотермическом процессе переданное газу количество теплоты расходуется на совершение газом работы.



От теории к практике

Сила давления идеального газа при изотермическом расширении совершила работу $A = 3640$ Дж. Какое количество теплоты получил газ?



Изобарный процесс. Если сосуд закрыт подвижным поршнем, то при нагревании увеличится как температура газа, так и его объём (рис. 80). Тогда первый закон термодинамики имеет вид:

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

При изобарном процессе переданное газу количество теплоты частично расходуется на

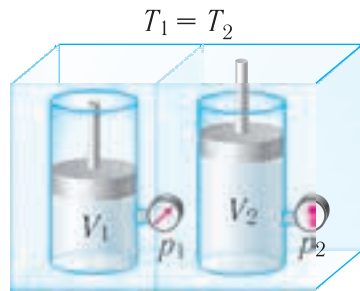


Рис. 79

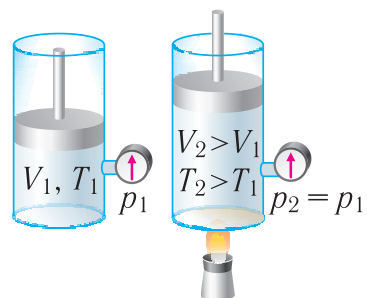


Рис. 80



увеличение внутренней энергии системы и частично идёт на совершение работы силой давления газа при его расширении.

С учётом того, что при изобарном процессе работа расширения (сжатия) газа $A = p\Delta V \neq 0$, первый закон термодинамики примет вид:

$$Q = \Delta U + p\Delta V.$$

От теории к практике



Сила давления идеального газа при изобарном расширении совершила работу $A = 320$ Дж. При этом газ получил количество теплоты $Q = 680$ Дж. Каково приращение внутренней энергии идеального газа?



Изменение внутренней энергии термодинамической системы при переходе из одного состояния в другое равно алгебраической сумме работы, совершённой внешними силами, и количества теплоты, полученного (или отданного) системой при взаимодействии с внешними телами:

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

Количество теплоты, полученное (или отданное) термодинамической системой при взаимодействии с внешними телами при её переходе из одного состояния в другое, идёт на приращение внутренней энергии системы и на работу, которую система совершает против внешних сил: $Q = \Delta U + A$

При изохорном процессе всё передаваемое системе количество теплоты идёт на увеличение её внутренней энергии:
 $Q = \Delta U$

При изотермическом процессе работа расширения или сжатия идеального газа сопровождается теплообменом между газом и термостатом:
 $A = Q$

При изобарном процессе переданное идеальному газу количество теплоты частично расходуется на увеличение внутренней энергии газа и частично идёт на совершение работы газом при его расширении:
 $Q = \Delta U + p\Delta V$





1. Приведите две формулировки первого закона термодинамики.
2. Чему равно изменение внутренней энергии при изохорном процессе?
3. На что расходуется количество теплоты, сообщаемое системе при изотермическом процессе?
4. На что расходуется количество теплоты, сообщаемое системе при изобарном процессе?
5. При быстром сжатии газа произошло повышение его температуры. Означает ли это, что газу сообщили некоторое количество теплоты? Можно ли утверждать, что внутренняя энергия газа увеличилась?
6. Заполните таблицу в тетради.

Процесс	Работа силы давления газа	Количество теплоты	Изменение внутренней энергии	Вывод
Изохорный ($V = \text{const}$ и $\Delta V = 0$)				
Изотермический ($T = \text{const}$ и $\Delta T = 0$)				
Изобарный ($p = \text{const}$)				



Примеры решения задач

Пример 1. Идеальный одноатомный газ, давление которого $p = 2,0 \cdot 10^5$ Па, изобарно расширяется так, что его объём возрастает на $\Delta V = 0,40$ м³. Определите приращение внутренней энергии газа и количество теплоты, получаемое им в этом процессе.

Дано:

$$p = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\Delta V = 0,40 \text{ м}^3$$

$$p = \text{const}$$

$$\Delta U \text{ — ?}$$

$$Q \text{ — ?}$$

Решение. Приращение внутренней энергии идеального одноатомного газа $\Delta U = \frac{3}{2} m R \Delta T$. При изобарном расширении идеального газа изменение его температуры ΔT связано с изменением объёма ΔV газа соотношением $\frac{m}{M} R \Delta T = p \Delta V$.

Тогда $\Delta U = \frac{3}{2} p \Delta V$. Согласно первому закону термодинамики для изобарного процесса $Q = \Delta U + p \Delta V$.

$$\text{Следовательно, } Q = \frac{3}{2} p \Delta V + p \Delta V = \frac{5}{2} p \Delta V.$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,40 \text{ м}^3 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,12 \text{ МДж},$$

$$Q = \frac{5}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,40 \text{ м}^3 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,20 \text{ МДж}.$$

Ответ: $\Delta U = 0,12$ МДж, $Q = 0,20$ МДж.

Пример 2. На рисунке 81 представлен график процесса изменения состояния некоторой массы идеального газа (участок $2 \rightarrow 3$ — изотерма). На каком участке графика работа силы давления газа: а) положительная; б) отрицательная? На каком участке графика газ: а) получал количество теплоты; б) отдавал? Как изменялась внутренняя энергия газа?

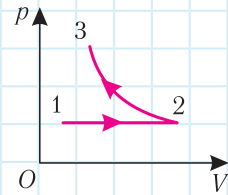


Рис. 81

Решение. Участок $1 \rightarrow 2$. Поскольку при постоянном давлении ($p = \text{const}$, $p_1 = p_2$) увеличивается объём газа ($\Delta V_{12} > 0$), то растёт и его температура ($\Delta T_{12} > 0$). Следовательно, работа силы давления газа $A_{12} > 0$ и приращение его внутренней энергии $\Delta U_{12} > 0$. Из первого закона термодинамики, записанного в виде $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12}$, следует, что $Q_{12} > 0$.

Участок $2 \rightarrow 3$. Поскольку температура газа не изменяется ($T = \text{const}$, $T_2 = T_3$, $\Delta T_{23} = 0$), то приращение его внутренней энергии $\Delta U_{23} = 0$. Объём газа уменьшается (изотермическое сжатие), и работа силы давления газа $A_{23} < 0$. Из первого закона термодинамики, записанного в виде $Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23}$, следует, что $Q_{23} < 0$.

Ответ:

Участок графика	Работа силы давления газа	Количество теплоты	Приращение внутренней энергии газа
$1 \rightarrow 2$	$A_{12} > 0$	$Q_{12} > 0$ (газ получал количество теплоты)	$\Delta U_{12} > 0$
$2 \rightarrow 3$	$A_{23} < 0$	$Q_{23} < 0$ (газ отдавал количество теплоты)	$\Delta U_{23} = 0$



Упражнение 10

1. Определите количество теплоты, сообщённое кислороду, если при изотермическом расширении работа, совершённая силой давления газа, $A = 6,4$ кДж.

2. С идеальным газом определённой массы осуществлён процесс, график которого представлен на рисунке 82. Чему равна работа силы давления газа? Получал или отдавал газ количество теплоты в этом процессе? Как изменилась внутренняя энергия газа?

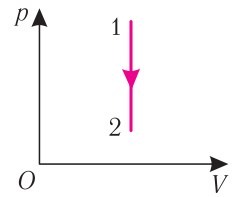


Рис. 82

Заполните таблицу в тетради (см. пример 2).

Работа силы давления газа	Количество теплоты	Приращение внутренней энергии газа

3. С идеальным газом определённой массы осуществлён процесс, график которого представлен на рисунке 83. Определите приращение внутренней энергии газа, если он отдал количество теплоты $Q_{12} = -2,25$ кДж.

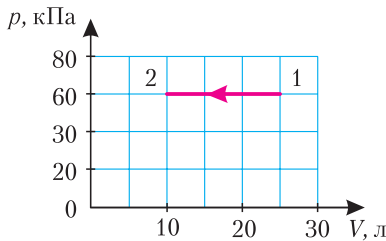


Рис. 83

4. В герметично закрытом баллоне находится азот массой $m = 4,00$ кг. Определите количество теплоты, сообщённое азоту при повышении его температуры на $\Delta T = 120$ К, если удельная теплоёмкость азота при постоянном объёме $c_V = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

5. При изобарном расширении силой давления идеального одноатомного газа совершена работа $A = 50,0$ кДж. Определите приращение внутренней энергии газа и сообщённое ему количество теплоты.

