

## § 5.1. Основные понятия т/д: т/д система, т/д параметры, т/д равновесие.

Везде в окружающем нас мире непрерывно совершаются процессы перехода энергии от одних тел (различных систем, включая и живые организмы) к другим, при этом энергия может превращаться из одного вида в другой. Такие процессы регулируются законами термодинамики.

Первой научной теорией тепловых процессов была не МКТ, а термодинамика, возникшая в середине XIX в., когда встал вопрос об увеличении экономической эффективности тепловых машин. Решение этого вопроса требовало глубокого знания законов энергетических превращений, в первую очередь превращения теплоты в механическую работу.

*Термодинамика* – учение о связи и взаимопревращениях различных видов энергии, теплоты и работы.

Термодинамика – наука о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии т/д равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Термодинамика строится на основе фундаментальных принципов (начал), которые являются обобщением многочисленных наблюдений и выполняются независимо от конкретной природы образующих систему тел. Поэтому закономерности и соотношения между физическими величинами, к которым приводит термодинамика, имеют универсальный характер.

Основными термодинамическими понятиями являются: *т/д система, т/д параметры, т/д равновесие.*

Под *термодинамической системой* понимают совокупность частиц (тел), которые могут взаимодействовать между собой и с другими частицами (телами) – обмениваться с ними энергией и веществом.

Примером термодинамической системы может служить газ, заключенный в цилиндр под поршнем. Состояние термодинамической системы характеризуется макроскопическими параметрами (их называют еще т/д параметрами). Для т/д системы идеального газа – т/д параметрами будут давление, температура, плотность и т. д.

Термодинамическая система находится в равновесии, если параметры системы с течением времени не меняются, и в системе нет каких-либо стационарных потоков (теплоты, вещества и др.)

В термодинамике рассматривают: *закрытые* т/д системы, не обменивающиеся веществом с другими системами; *открытые* т/д системы, обменивающиеся веществом и энергией с другими системами; *адиабатные* т/д системы, в которых отсутствует теплообмен с другими системами; *изолированные* т/д системы, не обменивающиеся с другими системами ни веществом ни энергией.

Если система не изолирована, то ее состояние может изменяться; изменение состояния термодинамической системы называется *термодинамическим процессом* (переход системы из первого состояния ( ) во второе ( )).

Термодинамическая система может быть физически однородной (гомогенной системой – системой, все части которой характеризуются одними и теми же физическими величинами, для которых градиенты равны нулю или бесконечно малы) и неоднородной (гетерогенной системой), состоящей из нескольких однородных частей с разными физическими свойствами. В результате фазовых и химических превращений гомогенная термодинамическая система может стать гетерогенной и наоборот.

## § 5.2. Первое начало термодинамики

Первое начало термодинамики есть *закон сохранения энергии для систем, в которых*

существенную роль играют тепловые процессы.

Энергетическую эквивалентность теплоты и работы, т. е. возможность измерения и сравнения их количеств в одних и тех же единицах была доказана Ю. Р. Майером (1842 г.) и особенно опытами Дж. Джоуля (1843 г.).

Основным понятием, входящим в этот закон является внутренняя энергия. *Внутренняя энергия*  $U$  - энергия физической системы, зависящая от ее внутреннего состояния, т. е. энергия, однозначно определяемая параметрами состояния.

Внутренняя энергия включает энергию хаотического (теплого) движения всех структурных элементов системы (идеальный газ) и энергию их взаимодействия, т. е.:

$$U = E_k + E_n \quad (5.1)$$

Кинетическая энергия движения системы как целого и ее потенциальная энергия во внешних силовых полях во внутреннюю энергию не входят.

В т/д особый интерес представляет не само знание внутренней энергии системы, а ее изменение  $\Delta U = U_2 - U_1$  при изменении состояния системы.

Существуют два принципиально различающихся способа изменения состояния системы.

Первый связан с работой системы по перемещению окружающих тел (или работой этих тел над системой), (например, при трении тел друг о друга они нагреваются – на этом основан древнейший способ добывания огня).

Второй связан с сообщением системе теплоты (или с отводом ее) при неизменном расположении окружающих тел.

В *общем случае* при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется одновременно как за счет совершения работы, так и за счет передачи теплоты.

Первый закон термодинамики формулируется именно для таких общих случаев: *изменение внутренней энергии системы  $\Delta U$  при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил над системой  $A$  и количества теплоты  $Q$ , переданного системе:*

$$(5.2)$$

Часто вместо работы внешних тел над системой рассматривают работу системы над внешними телами (рис. 5.1). Учитывая, что , первый закон т/д можно записать так:

$$(5.3)$$

*количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.*

Работа и теплота – взаимно превращаемые формы передачи энергии и в реальных условиях сопутствуют друг другу.

Работа проявляется в передаче энергии упорядоченного движения, а теплота – в передаче энергии хаотического движения частиц, составляющих систему.

Как показывает опыт, при заданных начальных и конечных состояниях системы количество теплоты и работа ( ) существенно зависят от пути перехода системы из одного состояния в другое.

Поскольку внутренняя энергия системы является однозначной функцией состояния физической системы, то хотя каждая из величин и ( ) зависит от характера процесса, переводящего систему из состояния с внутренней энергией в состояние с внутренней энергией , изменение определяется лишь значениями и , т. е. .

Таким образом, внутренняя энергия является полным дифференциалом, т. к. не зависит от пути перехода системы из одного состояния в другое.

Поэтому в дифференциальном виде при бесконечно малом изменении состояния системы:

$$\delta Q = dU + \delta A' \quad (5.4)$$

где  $\delta Q$  - бесконечно малое количество теплоты, переданное системе;  
 $\delta A'$  - элементарная работа, совершаемая системой против внешних сил;  
 $dU$  - изменение внутренней энергии системы.

Принято считать работу  $A' > 0$ , если она производится системой над внешними силами, а количество теплоты положительным, если оно передается системе.

Если система периодически возвращается в исходное состояние, то изменение внутренней энергии  $\Delta U = 0$ . И тогда, согласно первому закону термодинамики,  $A' = Q$ , т. е. следует вывод, что невозможно создать вечный двигатель (перпетуум-мобиле) I-го рода – двигатель, повторяющий один и тот же процесс, и способный выполнять работу, большую, чем полученная им энергия извне. В этом суть еще одной *формулировки I-го закона термодинамики*.

Первые проекты механического вечного двигателя относятся к 13 в. (Виллар де Оннекур, 1245 г., Пьер де Марикур, 1269 г., Франция). К концу 18 в. вследствие бесплодности многовековых попыток осуществления вечного двигателя среди ученых укрепилось убеждение о невозможности его создания, и с 1775 г. Парижская АН отказалась рассматривать проекты вечного двигателя.

### § 5.3. Внутренняя энергия идеального газа.

Выше говорилось о том, что под внутренней энергией тела подразумевают кинетическую энергию хаотического (теплового) движения его частиц и их взаимную потенциальную энергию, т. е.

$$U = E_k + E_n \quad (5.5)$$

Из определения идеального газа следует, что потенциальной энергией взаимодействия молекул идеального газа можно пренебречь, а значит, его внутренняя энергия определяется лишь кинетической энергией хаотического движения молекул, т. е.

Из МКТ известно, что средняя кинетическая энергия одной молекулы идеального газа равна  $\frac{m v^2}{2}$ , где  $\nu$  - число степеней свободы,  $T$  - абсолютная температура. Энергия одного моля газа (где находятся  $N_A$  молекул):

, так как

Если имеем газ массой  $M$ , то число молей в нем:  $\nu = \frac{M}{\mu}$ . Следовательно, энергия газа массой  $M$ :

$$(5.6)$$

Из (5.6) следует, что внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре, массе газа и обратно пропорциональна молярной массе газа и не зависит от объема и других макроскопических параметров системы.

Графики зависимостей внутренней энергии от  $T$ ,  $M$  и  $\mu$  могут быть представлены

на рисунках 5.2, 5.3, 5.4.

Изменение внутренней энергии данной массы идеального газа происходит только при изменении его температуры:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R (T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \cdot \Delta T \quad (5.7)$$

или

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \cdot dT \quad (5.8)$$

Изменение внутренней энергии 1 моля идеального газа:

$$dU = \frac{i}{2} R \cdot dT \quad (5.9)$$

#### § 5.4. Работа, совершаемая идеальным газом при изопроцессах.

Рассмотрим газ, заключенный в цилиндр с легко скользящим поршнем (без трения), площадь которого  $S$  (рис. 5.5).

При нагревании газ будет расширяться, действуя с силой  $\vec{f}_g$  на поршень. Элементарная работа  $\delta A'$ , совершаемая газом на бесконечно малом перемещении поршня  $dh$ , равна

$$\delta A' = f_g \cdot dh \quad (5.10)$$

Если  $P$  - давление газа, то

$$(5.11)$$

Подставив (5.11) в (5.10), получим

$$(5.12)$$

Произведение равно, очевидно, увеличению объема газа, поэтому

$$(5.13)$$

Если газ совершает работу, то и . При сжатии газа и работа (работу совершают окружающие тела, в частности поршень). Если изобразить процесс изменения объема газа графически с помощью кривой в координатах (рис. 5.6), то при увеличении объема газа на совершаемая им работа соответствует площади бесконечно узкой заштрихованной на графике полоски.

Очевидно, что работа, совершаемая газом при расширении его объема от до , складывается из элементарных работ . Графически она выражается площадью, заключенной между осью , кривой и ординатами и .

Величина этой площади зависит не только от начального и конечного объемов, но и формы кривой . Т. е. в отличие от внутренней энергии газа, совершаемая им работа существенно зависит от пути перехода из начального состояния в конечное.

Работу, совершаемую газом при расширении его объема от до , вычислим,

интегрируя уравнение (5.13), т. е.  $A'_{12} = \int_1^2 \delta A'$  или  $A'_{12} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$  (5.14)

т. е. работа равна сумме элементарных работ на участках, где давление постоянно.

Рассмотрим различные изопроцессы:

а) *Изобарический*:  $P = const$ . График рис. 5.7

$$A' = P \cdot (V_2 - V_1) \quad (5.15)$$

б) *Изотермический*:  $T = const$  График рис. 5.8

$$A' = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV = \left| \begin{array}{l} PV = \frac{m}{\mu} RT \\ P = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V} \end{array} \right| = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{\mu} R \cdot T \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$A' = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5.16)$$

в) *Изохорический*:  $V = const$  График рис. 5.9

$$A' = 0, \text{ т. к. } dV = 0$$

г) *Адиабатический* – процесс, протекающий в системе, которая не обменивается теплотой с окружающими телами. Для адиабатического процесса

, т. е. , тогда для молей газа:

или

$$(5.17)$$

### § 5.5. Применение первого закона термодинамики к различным изопроцессам.

а) *Изобарический*:

В этом случае при передаче системе теплоты ее температура увеличивается и изменяется объем, т. е. передаваемое газу количество теплоты идет на увеличение его внутренней энергии и на совершение им работы при постоянном давлении:

$$(5.18)$$

Примером изобарического процесса может служить нагревание воды в открытом сосуде, расширение газа в цилиндре со свободно ходящим поршнем (Рис. 5.9).

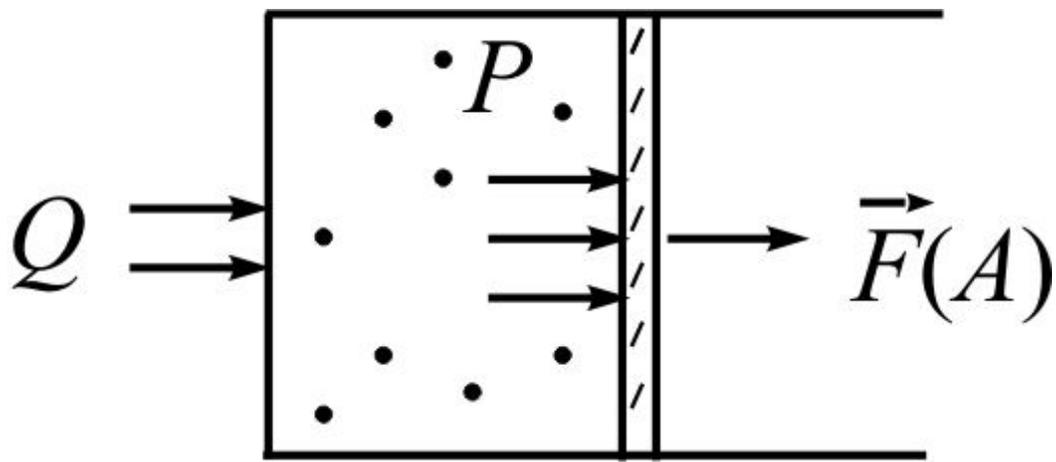


Рис. 5.9

б) Изотермический:  $T = const$ , при этом  $dU = 0$ , тогда все переданное газу количество теплоты идет на совершение работы данной системой

$$\delta Q = \delta A' \quad (5.19)$$

Примером изотермического процесса может быть процесс, происходящий в термостате, теплопроводность которого велика, так как температура системы практически не отличается от температуры термостата.

в) Изохорический:  $V = const$ , при этом  $\delta A' = 0$ .

Газ при нагревании работы не совершает. Все переданное системе тепло идет на увеличение ее внутренней энергии, т. е.

$$\delta Q = dU \quad (5.20)$$

Примером изохорического процесса может являться процесс, происходящий в герметическом сосуде, не меняющем своего объема.

г) Адиабатический: из  $\delta Q = 0$  имеем, что

$$(5.21)$$

Как следует из (5.21), при адиабатическом сжатии, когда совершается работа внешними силами, внутренняя энергия газа увеличивается, т. е. газ нагревается; при адиабатическом расширении газа с совершением им работы против внешних сил внутренняя энергия газа уменьшается, т. е. газ охлаждается.

Нагревание газа при адиабатическом сжатии используют в двигателях внутреннего сгорания; охлаждение же газа при адиабатическом расширении используют в устройствах для получения низких температур и сжижения газов.