

ГЛАВА 2

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 11. Термодинамическая система. Внутренняя энергия. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

Полную энергию физической системы можно представить как алгебраическую сумму её механической энергии и внутренних энергий тел, образующих систему. Убыль механической энергии системы в ряде случаев происходит при самопроизвольном переходе её части во внутреннюю энергию тел системы. Так, например, режущие инструменты заметно нагреваются при заточке. При скольжении конькобежца под коньками тает лёд, что обеспечивает хорошее скольжение. В этих примерах тела при трении нагреваются, и интенсивность теплового движения их молекул возрастает, что приводит к увеличению внутренней энергии тел. Как же определить внутреннюю энергию термодинамической системы? И что понимают под термодинамической системой?

Термодинамическая система. В термодинамике физические тела и их модели называют *термодинамическими системами*. Для их описания используют параметры системы, такие, как давление, объём, температура (макропараметры), а не физические характеристики молекул (микропараметры). Макропараметры можно непосредственно измерить, используя приборы, или выразить через другие величины, которые можно измерить на опыте. Мы рассмотрим простейшие термодинамические системы, состояние которых определяют, используя только давление, объём и температуру.

Тела, образующие термодинамическую систему, могут обмениваться с окружающей средой энергией, а также веществом. Если этого не происходит, то термодинамическую систему называют *замкнутой* или *изолированной*.



От теории к практике

В одном случае газ находится в герметично закрытом теплонепроницаемом сосуде, а в другом — в стеклянной колбе. В каком случае газ как термодинамическая система является изолированным?



Внутренняя энергия. Рассматривая полную энергию макроскопического тела, необходимо учитывать не только его механическую энергию (кинетическую и потенциальную), но также и энергию, заключённую внутри самого тела, — *внутреннюю энергию*.

Внутренняя энергия макроскопического тела — алгебраическая сумма кинетической энергии теплового движения всех частиц, образующих тело, и потенциальной энергии их взаимодействия.

Внутренняя энергия любой термодинамической системы состоит из внутренних энергий тел, входящих в данную систему, и является одной из основных физических величин, используемых в термодинамике.

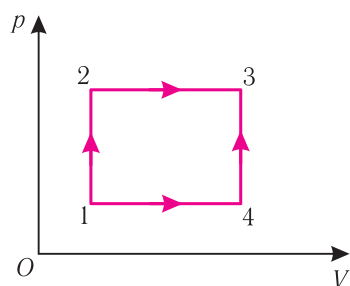


Рис. 62

В термодинамике представляет интерес не само значение внутренней энергии системы, а её изменение. Поэтому обычно принимают во внимание только те составляющие внутренней энергии, которые изменяются в рассматриваемых процессах.

Рассмотрим переход некоторой массы идеального газа из состояния 1 , в котором его внутренняя энергия U_1 , в состояние 3 , в котором его внутренняя энергия U_3 (рис. 62). Смену состояний можно осуществить или при изохорном нагревании, а затем при изобарном расширении (процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$), или при изобарном расширении, а затем при изохорном нагревании (процесс $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$). Однако приращение* внутренней энергии газа в обоих случаях одинаково:

$$\Delta U_{123} = \Delta U_{143} = U_3 - U_1.$$

Внутренняя энергия зависит от конкретного состояния системы. Это означает, что **изменение внутренней энергии при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое зависит только от значений параметров этих состояний и не зависит от процесса перехода.**

* Δ — приращение физической величины, т. е. разность между её конечным и начальным значениями;

$-\Delta$ — убыль величины, т. е. разность между её начальным и конечным значениями.

От теории к практике

На рисунке 63 представлены графики 1 и 2 зависимости внутренней энергии двух идеальных газов определённой массы от абсолютной температуры. Одинаковы ли приращения внутренней энергии газов?

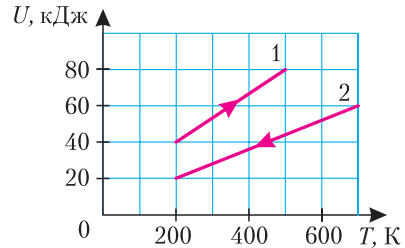


Рис. 63

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа. Определим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа, т. е. газа, образованного атомами. Например, одноатомными газами являются инертные газы — гелий, неон, аргон и др.

Из определения понятия «идеальный газ» следует, что его внутренняя энергия является суммой кинетических энергий хаотического движения всех атомов (или молекул) (потенциальная энергия взаимодействия между частицами отсутствует). Следовательно, внутренняя энергия идеального одноатомного газа равна произведению средней кинетической энергии $\langle E_k \rangle$ теплового движения частиц на их число N , т. е. $U = N\langle E_k \rangle$. Поскольку

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

где m — масса газа, а $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT$, то

$$U = \frac{m}{M} N_A \cdot \frac{3}{2}kT.$$

С учётом того, что произведение постоянной Больцмана и постоянной Авогадро $kN_A = R$, где R — универсальная газовая постоянная, получим:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT, \quad (11.1)$$

или

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

Из формулы (11.1) следует, что **внутренняя энергия данной массы идеального одноатомного газа пропорциональна его абсолютной температуре**. Она не зависит от других макроскопических параметров состояния — давления и объёма. Следовательно, изменение внутренней энергии данной массы одноатомного идеального газа происходит только при изменении его температуры:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

От теории к практике

1. Воздух при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении можно описывать моделью идеального газа. Как показывают расчёты, внутренняя энергия двухатомного газа больше внутренней энергии одинакового количества одноатомного газа, находящегося при такой же температуре, в $\alpha = \frac{U_{\text{двухат}}}{U_{\text{одноат}}} = \frac{5}{3}$ раза. Учтывая, что воздух состоит в основном из двухатомных молекул, оцените внутреннюю энергию воздуха в комнате, длина которой $a = 3,0$ м, ширина $b = 3,2$ м, высота $c = 2,5$ м.

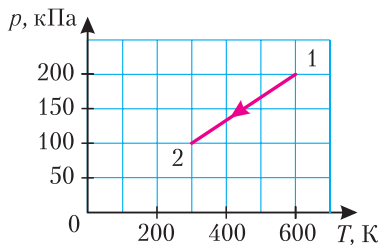


Рис. 64

Сравните полученный результат с кинетической энергией грузового автомобиля массой $m = 10$ т, движущегося со скоростью, модуль которой $v = 54 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Сделайте вывод.

2. Идеальный одноатомный газ, количество вещества которого $\nu = 10,0$ моль, перевели из состояния 1 в состояние 2 (рис. 64). Как и на сколько изменилась внутренняя энергия газа?

При определении внутренней энергии реальных газов, жидкостей и твёрдых тел необходимо учитывать потенциальную энергию взаимодействия частиц, которая зависит от расстояния между ними. Поэтому в общем случае внутренняя энергия макроскопических тел зависит не только от абсолютной температуры, но и от объёма.

Изменить внутреннюю энергию термодинамической системы можно двумя способами: используя теплообмен и совершая работу. Процесс теплообмена и совершение работы характеризуют соответственно физическими величинами — количеством теплоты Q и работой A , которые являются мерами изменения внутренней энергии системы.



Физические тела и их модели в термодинамике называют термодинамическими системами. Термодинамическую систему характеризуют набором макропараметров, определяющих её состояние

Внутренняя энергия макроскопического тела — алгебраическая сумма кинетической энергии теплового движения всех частиц, образующих тело, и потенциальной энергии их взаимодействия

Изменение внутренней энергии при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое зависит только от значений параметров этих состояний и не зависит от процесса перехода

Внутренняя энергия данной массы идеального одноатомного газа зависит только от температуры

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

Способы изменения внутренней энергии ↓

совершение работы

теплообмен



1. Что называют термодинамической системой?
2. Что понимают под внутренней энергией макроскопического тела? термодинамической системы?
3. Что представляет собой внутренняя энергия идеального газа? От чего зависит её значение?
4. Идеальный газ переводят из состояния 1 в состояние 3 двумя различными способами: изотермически ($1 \rightarrow 3$) и осуществляя сначала изобарное расширение, а затем изохорное охлаждение ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$) (рис. 65). Зависит ли приращение внутренней энергии газа от способа его перехода из состояния 1 в состояние 3?
5. От каких параметров зависят значения внутренней энергии идеального газа и внутренней энергии реальных газов?

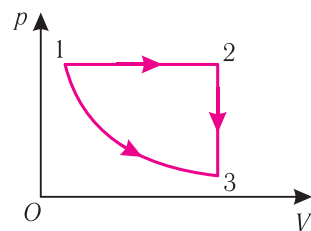


Рис. 65

Пример решения задачи

При изобарном охлаждении внутренняя энергия идеального одноатомного газа изменилась на $\Delta U = -6,0 \cdot 10^2$ Дж. Определите давление газа, если его объём изменился на $\Delta V = -1,0 \cdot 10^2$ см³.

Дано:

$$\begin{aligned} \Delta U &= -6,0 \cdot 10^2 \text{ Дж} \\ \Delta V &= -1,0 \cdot 10^2 \text{ см}^3 = \\ &= -1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \end{aligned}$$

p — ?

Решение. Приращение внутренней энергии некоторого количества идеального одноатомного газа

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T. \quad (1)$$

Используя уравнение Клапейрона–Менделеева, можно осуществить замену:

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

Решая совместно уравнения (1) и (2), получим: $p = \frac{2\Delta U}{3\Delta V}$.

$$p = \frac{2 \cdot (-6,0 \cdot 10^2 \text{ Дж})}{3 \cdot (-1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3)} = 4,0 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Ответ: $p = 4,0 \cdot 10^6$ Па.

Упражнение 7

1. Определите внутреннюю энергию аргона массой $m = 4,0$ г при температуре $t = 27$ °С.

2. Определите приращение внутренней энергии идеального одноатомного газа, количество вещества которого $\nu = 2,0$ моль, при его нагревании на $\Delta t = 20$ °С.

3. Идеальный одноатомный газ занимает объём $V = 4,0$ л, его давление $p = 0,30$ МПа. Определите внутреннюю энергию газа.

4. При изменении состояния идеального одноатомного газа его объём увеличился в $\alpha = 2,4$ раза, а давление уменьшилось в $\beta = 1,2$ раза. Определите отношение значений внутренней энергии газа в конечном и начальном состояниях.

5. Масса гелия $m = 2,0$ кг, его давление $p = 60$ кПа. Определите внутреннюю энергию гелия, если его плотность $\rho = 0,20 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

6. При температуре $t = 27$ °С внутренняя энергия одноатомного идеального газа $U = 1,2$ Дж. Определите число атомов газа.