

**Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Государственное высшее учебное заведение
«Национальный горный университет»**

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ
ПО РАЗДЕЛУ**

“МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА”

для студентов специальностей 0906 ГВУЗ «НГУ»

Днепропетровск

2012

Методическое пособие для самостоятельной работы по разделу "Молекулярная физика и термодинамика" курса физики для студентов специальности 0906 ГВУЗ «НГУ».

Сост.: Л.Ф.Мостипан, И.П. Гаркуша,

Днепропетровск: ГВУЗ «НГУ», 2011 г.

1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Молекулярная физика — раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении.

Термодинамика — раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.

Термодинамическая система — совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой).

Термодинамические параметры (параметры состояния) — совокупность физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы.

Обычно в качестве параметров состояния выбирают температуру, давление и удельный объем.

Термодинамическое равновесие — равновесие макроскопической системы, если ее состояние с течением времени не изменяется.

Температура — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

В соответствии с решением XI Генеральной конференции по мерам и весам (1960) можно применять только две температурные шкалы — **термодинамическую** и **Международную практическую**, градуированные соответственно в кельвинах (К) и в градусах Цельсия (°С).

В **Международной практической шкале** температура замерзания и кипения воды при давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па равна соответственно 0 и 100°С (**реперные точки**). Термодинамическая температурная шкала определяется по одной реперной точке, в качестве которой взята **тройная точка воды** (температура, при которой лед, вода и насыщенный пар при давлении 609 Па находятся в термодинамическом равновесии). Формула, связывающая термодинамическую температуру и температуру по Международной практической шкале

$$T = 273,15 + t.$$

Термодинамический процесс — любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее термодинамических параметров.

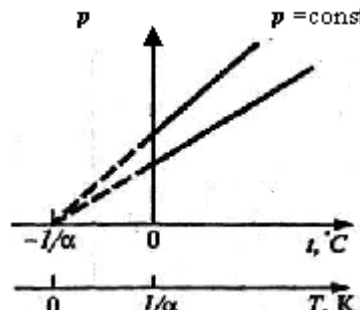
Идеальный газ — идеализированная модель, согласно которой:

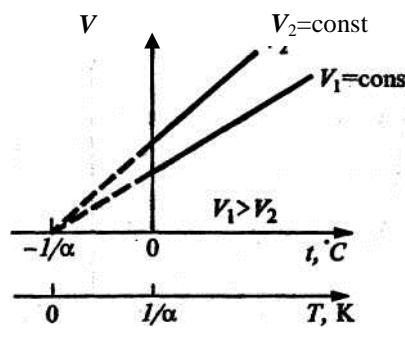
- 1) собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда;
- 2) между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;
- 3) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

<p>Закон Бойля—Мариотта: для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная</p> <p>[p — давление, V — объем, T — термодинамическая температура, m — масса газа].</p>	$pV = const$ <p>($T = const, m = const$)</p>
---	---

<p>Изотермический процесс — процесс, происходящий при постоянной температуре.</p> <p>Изотерма — график зависимости между параметрами состояния газа при постоянной температуре. Изотермы в координатах p, V — гиперболы, расположенные на графике тем выше, чем выше температура, при которой происходит процесс.</p>	
--	--

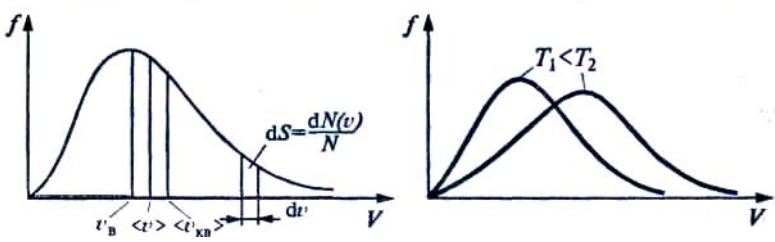
<p>Закон Гей-Люссака (формулировки):</p> <p>1. Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой.</p>	$V = V_0(1 + \alpha t)$ <p>или $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$;</p> <p>($p = const, m = const$)</p>
<p>2. Давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой</p> <p>[t — температура по шкале Цельсия; V_0 и p — соответственно объем и давление при</p>	$p = p_0(1 + \alpha t)$ <p>или $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$;</p>

<p>0°C; коэффициент $\alpha=(1/273)K^{-1}$; индексы 1 и 2 относятся к произвольным состояниям].</p>	<p>$(V = const, m = const)$</p>
<p>Изобарный процесс — процесс, происходящий при постоянном давлении.</p> <p>Изобара — график зависимости между параметрами состояния газа при постоянном давлении.</p>	

<p>Изохорный процесс — процесс, происходящий при постоянном объеме.</p> <p>Изохора — график зависимости между параметрами газа при постоянном объеме газа.</p>	
--	--

<p>Закон Авогадро: моли любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковые объемы.</p>	
<p>Молярный объем — физическая величина, равная отношению объема однородной системы к количеству вещества системы.</p>	$V_m = \frac{V}{\nu}$
<p>Постоянная Авогадро — число атомов (молекул или других структурных единиц), содержащихся в одном моле различных веществ.</p>	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
<p>Молярная масса — масса 1 моль вещества [m_0 — масса молекулы, N_A — постоянная Авогадро].</p>	$M = m_0 N_A$
<p>Единица молярной массы — килограмм на моль (кг/моль). Килограмм на моль равен</p>	<p>1 кг/моль</p>

молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг.	
<p>Закон Дальтона: <i>давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов</i></p> <p>$[p_1, p_2, \dots, p_n$ - парциальное давление, которое оказывали бы газы смеси, если бы они одни занимали объем, равный объему смеси при той же температуре].</p>	$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$
<p>Уравнение Клапейрона— Менделеева (уравнение состояния идеального газа)</p> <p>$[V$ — объем; R — молярная газовая постоянная; M — молярная масса газа; m — масса газа; $m/M = \nu$ — количество вещества].</p>	$pV = \frac{m}{M} RT$
Молярная газовая постоянная	$R=8,31$ Дж/(моль·К)
<p>Постоянная Больцмана</p> <p>$[R$ — молярная газовая постоянная; N_A — постоянная Авогадро].</p>	$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
<p>Зависимость давления газа от концентрации молекул n (числа молекул в 1 м³ газа) и температуры T</p> <p>$[k$ — постоянная Больцмана].</p>	$p = nkT$
<i>Давление идеального газа прямо пропорционально концентрации газа молекул или его плотности.</i>	
<p>Постоянная Лошмидта — число молекул, содержащихся в 1 м³ газа при нормальных условиях.</p>	$N_L = \frac{p_0}{kT_0} = 2,68 \cdot 10^{25}$ м ⁻³
<p>Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов</p> <p>$[\langle v \rangle$ — средняя квадратичная скорость молекул; E — суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул газа; n — концентрация молекул; m_0 - масса одной молекулы; $'m = Nm_0$ — масса газа; N — число молекул в объеме V газа].</p>	$p = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{кв} \rangle^2,$ $pV = \frac{2}{3} E,$ $pV = \frac{1}{3} m \langle v_{кв} \rangle^2$

<p>Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа.</p>	$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT$
<p>Закон Максвелла для распределения молекул идеального газа по скоростям.</p> <p>Функция $f(v)$ распределения молекул по скоростям определяет относительное число молекул $dN(v)/N$ из общего числа N молекул, скорости которых лежат в интервале от v до $v + dv$.</p>	$f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv} =$ $= 4\pi N \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^2$
	

Из функции распределения следует, что при повышении температуры максимум функции распределения молекул по скоростям сместится вправо (значение наиболее вероятной скорости становится больше). Однако площадь, ограниченная кривой, остается неизменной, поэтому при повышении температуры кривая распределения молекул по скоростям будет растягиваться и понижаться.

<p>Скорость молекул:</p> <p>средняя квадратичная</p>	$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$
<p>средняя арифметическая</p>	$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$
<p>наиболее вероятная (скорость, при которой функция распределения молекул идеального газа по скоростям максимальна)</p>	$\langle v_{в} \rangle = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$

$[m_0 — \text{масса молекулы}].$

Закон Максвелла для распределения молекул идеального газа по энергиям теплового движения. Функция $f(\varepsilon)$ распределения молекул по энергиям теплового движения определяет относительное число молекул $dN(\varepsilon)/N$ из общего числа N молекул, которые имеют кинетические энергии $\varepsilon = m_0 v^2/2$, заключенные в интервале от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$.

$$f(\varepsilon) = \frac{dN(\varepsilon)}{Nd\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{\pi}(kT)^{3/2}} N \varepsilon^{1/2} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right) d\varepsilon$$

При решении задач на закон распределения молекул по относительным скоростям $u = \frac{v}{v_{\text{вер}}}$ удобно пользоваться таблицей 1, в которой приведены значения $\frac{\Delta N}{N\Delta u}$ для разных u .

Таблица 1

u	$\frac{\Delta N}{N\Delta u}$	u	$\frac{\Delta N}{N\Delta u}$	u	$\frac{\Delta N}{N\Delta u}$
0	0	0,9	0,81	1,8	0,29
0,1	0,02	1,0	0,83	1,9	0,22
0,2	0,09	1,1	0,82	2,0	0,16
0,3	0,18	1,2	0,78	2,1	0,12
0,4	0,31	1,3	0,71	2,2	0,09
0,5	0,44	1,4	0,63	2,3	0,06
0,6	0,57	1,5	0,54	2,4	0,04
0,7	0,68	1,6	0,46	2,5	0,03
0,8	0,76	1,7	0,36		

Во многих случаях важно знать число молекул N_x , скорости которых превышают заданное значение скорости u . В таблице 2 приведены значения

$\frac{N_x}{N}$ для разных u , где N - общее количество молекул.

Таблица 2

u	$\frac{N_x}{N}$	u	$\frac{N_x}{N}$	u	$\frac{N_x}{N}$

0	1,000	0,6	0,868	1,25	0,374
0,2	0,994	0,7	0,806	1,5	0,213
0,4	0,957	0,8	0,734	2,0	0,046
0,5	0,918	1,0	0,572	2,5	0,0057

Барометрическая формула [p и p_0 - давление газа на высоте h и h_0].	$p = p_0 \exp\left(-\frac{Mg(h-h_0)}{RT}\right)$
Распределение Больцмана во внешнем потенциальном поле [n и n_0 — концентрация молекул на высоте h и $h = 0$; $E_p = m_0gh$ — потенциальная энергия молекулы в поле тяготения].	$n = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_p}{kT}\right)$
Среднее число соударений , испытываемых молекулой газа за 1 с [d — эффективный диаметр молекулы (минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул); n — концентрация молекул; $\langle v \rangle$ — средняя арифметическая скорость молекул].	$\langle z \rangle = \sqrt{2}\pi d^2 n \langle v \rangle$
Средняя длина свободного пробега молекул газа — среднее расстояние между двумя последовательными столкновениями молекулы.	$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$

Явления переноса — необратимые процессы в термодинамически неравновесной системе, в результате которых происходит пространственный перенос энергии, массы, импульса.

К явлениям переноса относят **теплопроводность** (обусловлена переносом энергии), **диффузию** (обусловлена переносом массы) и **внутреннее трение** (обусловлено переносом импульса).

Закон теплопроводности Фурье [j_E — плотность теплового потока; λ — теплопроводность, dT/dx — градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины x в направлении нормали к этой площадке. Знак минус показывает, что при теплопроводности энергия	$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}$
--	--------------------------------

<p>переносится в направлении убывания температуры].</p>	
<p>Плотность теплового потока — физическая величина, определяемая энергией, переносимой в форме теплоты за 1 с через площадь 1 м², перпендикулярную оси x.</p>	$j_E = \frac{dQ}{ds \cdot dt}$
<p>Теплопроводность (коэффициент теплопроводности) $[c_v$ - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; ρ - плотность газа; $\langle v \rangle$-средняя арифметическая скорость его молекулы; $\langle l \rangle$ - средняя длина свободного пробега молекул].</p>	$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$
<p>Закон диффузии Фика $[j_m$ — плотность потока массы; D — диффузия (коэффициент диффузии); — градиент плотности, равный скорости изменения плотности на единицу длины x в направлении нормали к этой площадке. Знак минус показывает, что перенос массы происходит в направлении убывания плотности].</p>	$j_m = -D \frac{d\rho}{dx}$
<p>Плотность потока массы — физическая величина, определяемая массой вещества, диффундирующего за 1 с через площадь 1 м², перпендикулярную оси x.</p>	$j_m = \frac{dm}{ds \cdot dt}$
<p>Диффузия (коэффициент диффузии).</p>	$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle$
<p>Закон Ньютона для внутреннего трения (вязкости) $[j_p$ — плотность потока импульса; η — динамическая вязкость; dv/dx - градиент скорости, показывающий быстроту изменения скорости в направлении x, перпендикулярном направлению движения слоев. Знак минус указывает, что импульс переносится в направлении убывания скорости].</p>	$j_p = -\eta \frac{dv}{dx}$
<p>Плотность потока импульса — физическая величина, определяемая полным импульсом, переносимым за 1 с в положительном</p>	$j_p = \frac{dP}{ds \cdot dt}$

направлении оси x через площадь 1 м^2 , перпендикулярную оси x .	
Динамическая вязкость	$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$

2. ТЕРМОДИНАМИКА

Внутренняя энергия U — энергия хаотического (теплого) движения микрочастиц системы (молекул, атомов, электронов, ядер и т. д.) и энергия взаимодействия этих частиц.

Внутренняя энергия — однозначная функция термодинамического состояния системы, т. е. в каждом состоянии система обладает вполне определенной внутренней энергией (она не зависит от того, как система пришла в данное состояние).

Закон Больцмана о равномерном распределении энергии степеням свободы молекул: для статистической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная $kT/2$, а на каждую колебательную степень свободы энергия, равная kT .

Колебательная степень «обладает» вдвое большей энергией, так как на нее приходится не только кинетическая энергия (как в случае поступательного и вращательного движений), но потенциальная, причем средние значения кинетической и потенциальной энергий одинаковы.

Средняя энергия молекулы [i — сумма поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы].	$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$
Внутренняя энергия идеального газа [m — масса газа, M — молярная масса газа, R — молярная газовая постоянная].	$U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT$
Первое начало термодинамики: <i>теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил.</i>	$Q = \Delta U + A$
Если система периодически возвращается в первоначальное состояние, изменение ее внутренней энергии $\Delta U=0$. Тогда, согласно первому началу термодинамики, $A = Q$.	
Первое начало термодинамики для бесконечно малого изменения	

системы. [dU — бесконечно малое изменение внутренней энергии, δA — элементарная работа, δQ — бесконечно малое количество теплоты; dU — полный дифференциал, а A и Q таковыми не являются].	$\delta Q = dU + \delta A$
Вечный двигатель первого рода — <i>периодически действующий двигатель, который совершал бы большую работу, чем сообщенная ему извне энергия, — невозможен</i> (одна из формулировок первого начала термодинамики).	
Теплоемкость — физическая величина, численно равная отношению количества теплоты ΔQ , сообщаемого телу, к изменению температуры тела в термодинамическом процессе.	$C_T = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$
Удельная теплоемкость вещества — величина, определяемая количеством теплоты, необходимым для нагревания 1 кг вещества на 1 К.	$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}$
Единица удельной теплоемкости — Джоуль на килограмм-Кельвин.	Дж/(кг·К)
Молярная теплоемкость — величина, определяемая количеством теплоты, необходимым для нагревания 1 моль вещества на 1 К [$\nu = m/M$ — количество вещества].	$C = \frac{\Delta Q}{\nu\Delta T}$
Единица молярной теплоемкости — Джоуль на моль-Кельвин	Дж/(моль К)
Формула, связывающая удельную теплоемкость с молярной [M — молярная масса вещества].	$C = cM$
Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.	$C_V = \frac{iR}{2}$
Молярная теплоемкость при постоянном давлении.	$C_p = \frac{(i+2)R}{2}$
Уравнение Майера <i>показывает, что C_p всегда больше C_V на величину молярной газовой постоянной. Это объясняется тем, что при нагревании газа при постоянном давлении требуется еще дополнительное количество теплоты на совершение работы расширения газа, так как постоянство давления обес-</i>	$C_p = C_V + R$

печивается увеличением объема газа.	
Изменение внутренней энергии идеального газа	$\Delta U = \frac{m}{M} C_V \Delta T$
Работа, совершаемая газом при изменении его объема	$dA = p dV$
<ul style="list-style-type: none"> Полная работа при изменении объема газа [V_1 и V_2 — соответственно начальный и конечный объемы газа]. 	$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$
Работа газа при изобарном процессе	$A = p(V_2 - V_1)$

Используя уравнение Клапейрона-Менделеева, выражению для работы можно придать вид, из которого следует *физический смысл молярной газовой постоянной R*: если $T_2 - T_1 = 1$ К, то для 1 моль газа $R = A$, т. е. *R численно равна работе изобарного расширения 1 моль идеального газа при нагревании его на 1 К.*

Работа газа при изотермическом процессе	$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$
Адиабатный процесс — процесс, при котором отсутствует теплообмен ($Q = 0$) между системой и окружающей средой.	
Уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона) [γ — показатель адиабаты].	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma ; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} ;$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} .$
Диаграмма адиабатного процесса (адиабаты) в координатах p, V изображается гиперболой. На рисунке видно, что адиабата более крута, чем изотерма ($pV = \text{const}$). Это объясняется тем, что при адиабатном сжатии увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, как при изотермическом сжатии, но и повышением температуры.	
Показатель адиабаты.	$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i} .$

<p>Работа газа при адиабатном процессе $[T_1, T_2$ и V_1, V_2 — соответственно начальные и конечные температура и объем газа].</p>	$A = \frac{m}{M} C_v (T_1 - T_2),$ $A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{M} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$
--	---

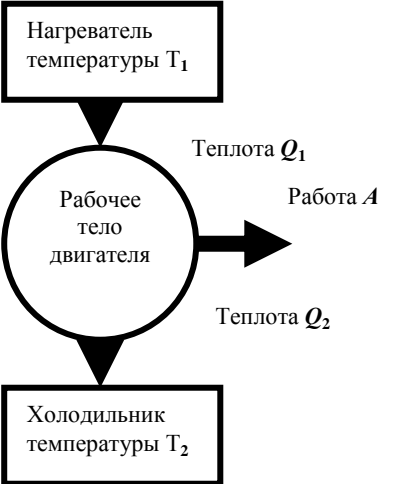
Политропный процесс — процесс, в котором теплоемкость остается постоянной. $C = 0, n = \gamma$, получим уравнение адиабаты; при $C = , n = 1$ — уравнение изотермы при $C = C_v, n = 0$ — уравнение изобары при $C = C_v, n = \pm$ — уравнение изохоры. Таким образом, все рассмотренные процессы являются частными случаями политропного процесса.

<p>Уравнение политропного процесса $[n$- показатель политропы].</p>	$pV^n = const$
<p>Показатель политропы</p>	$n = \frac{C - C_p}{C - C_v}$
<p>Круговой процесс (цикл) — процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное.</p>	

- **Прямой цикл** — цикл, при котором совершается положительная работа.

- **Обратный цикл** — цикл, при котором совершается отрицательная работа.

Тепловой двигатель — периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет полученной извне теплоты.

<p>Принцип действия теплового двигателя приведен на рисунке. От термостата с более высокой температурой T_1, называемого нагревателем, за цикл отнимается количество теплоты Q_1, а термостату с более низкой температурой T_2, называемому холодильником, за цикл передается количество теплоты Q_2, при этом совершается работа $A = Q_1 - Q_2$.</p> <p>Рабочее тело — тело, совершающее круговой процесс и обменивающееся энергией с другими телами.</p>	
---	--

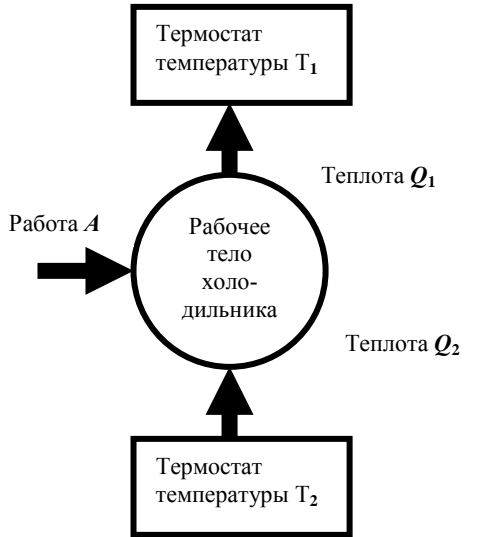
Чтобы термический коэффициент полезного действия теплового двигателя был $\eta = 1$, должно быть выполнено условие $Q_2 = 0$, т. е. тепловой двига-

тель должен иметь один источник теплоты, а это невозможно. Так, французский физик и инженер Н. Л. С. Карно показал, что *для работы теплового двигателя необходимо не менее двух источников теплоты с различными температурами, иначе это противоречило бы второму началу термодинамики.*

<p>Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса (цикла) [Q_1—количество теплоты, полученное системой; Q_2— количество теплоты, отданное системой; A - работа, совершаемая за цикл].</p>	$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$
<p>Термический коэффициент полезного действия цикла Карно (цикла, состоящего из двух изотерм и двух адиабат) [Q_1 — количество теплоты, полученное газом от нагревателя при изотермическом расширении; Q_2 — количество теплоты, отданное газом холодильнику при изотермическом сжатии; T_1 — температура нагревателя; T_2 — температура холодильника].</p>	$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

Холодильная машина — периодически действующая установка, в которой за счет работы внешних сил теплота переносится к телам с более высокой температурой. Принцип действия холодильной машины представлен на рисунке.

Системой за цикл от термостата с более низкой температурой T_2 отнимается количество теплоты Q_2 и отдается термостату с более высокой температурой T_1 количество теплоты Q_1 . Для процесса $Q = A$, но, по условию, $Q = Q_1 - Q_2 < 0$, поэтому $A < 0$ и $Q_2 - Q_1 = -A$, или $Q_1 = Q_2 + A$ т. е. количество теплоты, отданное системой источнику теплоты при более высокой температуре T_1 , больше количества теплоты Q_2 , полученного от источника теплоты при более низкой температуре T_2 , на величину работы, совершенной над системой. Следовательно, для совершения работы нельзя отбирать теплоту от менее нагретого тела и отдавать ее более нагретому.



Обратимый процесс — термодинамический процесс, который может происходить как в прямом, так и в обратном направлении, причем если такой процесс происходит сначала в прямом, а затем в обратном направлении и система возвращается в исходное состояние, то в окружающей среде и в этой системе не происходит никаких изменений.

Всякий процесс, не удовлетворяющий этим условиям, является **необратимым**.

Обратимые процессы — это *идеализация* реальных процессов.

Приведенное количество теплоты — физическая величина, равная отношению количества теплоты Q , полученного телом в изотермическом процессе, к температуре T теплоотдающего тела. Приведенное количество теплоты, сообщаемое телу на бесконечно малом участке процесса, равно $\delta Q/T$.

$$S = \frac{Q}{T}$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Приведенное количество теплоты, сообщаемое телу в любом обратимом круговом процессе, равно нулю.

$$\Delta S = \oint \frac{dQ}{T} = 0$$

Подынтегральное выражение $\delta Q/T$ — полный дифференциал некоторой функции, которая определяется только состоянием системы и не зависит от пути, каким система пришла в это состояние.

Энтропия — функция состояния, полным дифференциалом которой является $\delta Q/T$.

Неравенство Клаузиуса: энтропия замкнутой системы может либо возрасть (в случае необратимых процессов), либо оставаться постоянной (в случае обратимых процессов).

Для адиабатного процесса $\delta Q = 0$, тогда $dS = 0$ и, следовательно, $S = \text{const}$, т. е. *адиабатный обратимый процесс протекает при постоянной энтропии*, поэтому его называют *изоэнтропийным* процессом.

<p>Термодинамическая вероятность W состояния системы — число способов, которыми может быть реализовано данное состояние макроскопической системы, или число микросостояний, осуществляющих данное макросостояние [по определению, $W > 1$, т. е. термодинамическая вероятность не есть вероятность в математическом смысле (последняя $< 1!$)].</p> <p>Формула Больцмана связывает энтропию S системы и термодинамическую вероятность W [k — постоянная Больцмана].</p>	$S = k \ln W$
---	---------------

Энтропия определяется логарифмом числа микросостояний, с помощью которых может быть реализовано данное макросостояние.. Формула Больцмана позволяет дать энтропии следующее статистическое толкование: *энтропия является мерой неупорядоченности системы*.

Принцип возрастания энтропии: все процессы в замкнутой системе ведут к увеличению ее энтропии.

При статистическом толковании энтропии это означает, что процессы в замкнутой системе идут в направлении увеличения числа микросостояний, иными словами, от менее вероятных состояний к более вероятным, до тех пор пока вероятность состояния не станет максимальной.

Второе начало термодинамики (формулировки).

♦ По Кельвину: *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу;*

вечный двигатель второго рода — *периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет охлаждения одного источника теплоты, — невозможен.*

По Клаузиусу: *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому.*

•

Третье начало термодинамики (теорема Нернста—Планка): *энтропия всех тел в состоянии равновесия стремится к нулю по мере приближения температуры к 0 К.*

3. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ, ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

В случае реальных газов — газов, свойства которых зависят от взаимодействия молекул, надо учитывать силы межмолекулярного взаимодействия. Они проявляются на расстояниях $< 10^{-9}$ м и быстро убывают при увеличении расстояния между молекулами. Такие силы называют *короткодействующими*.

На рисунке приведена качественная зависимость сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния r между молекулами [F_o и F_n - соответственно силы отталкивания и притяжения, F — их результирующая]. Силы отталкивания считаются *положительными*, а силы взаимного притяжения — *отрицательными*.

На расстоянии $r = r_0$ результирующая сила $F = 0$, т.е. силы притяжения и отталкивания уравниваются друг друга. Расстояние r_0 соответствует равновесному расстоянию между молекулами, на котором бы они находились в отсутствие теплового движения. При $r < r_0$ преобладают силы отталкивания ($F > 0$), при $r > r_0$ — силы притяжения ($F < 0$). На расстояниях $r > 10^{-9}$ м межмолекулярные силы взаимодействия практически отсутствуют ($F = 0$).

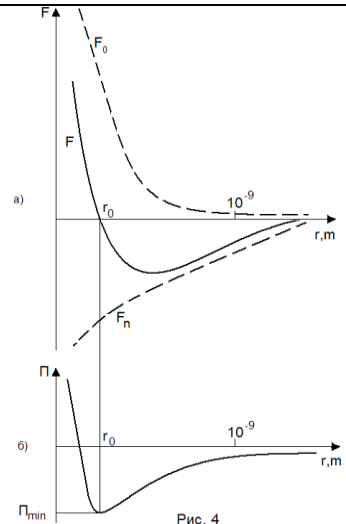


Рис. 4

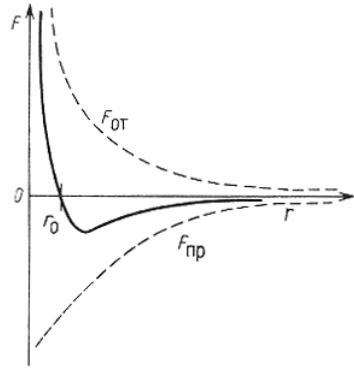


Рис. 2.1

Уравнение Ван-дер-Ваальса для газа (уравнение состояния реальных газов)
 [V_m — молярный объем; a и b — постоянные Ван-дер-Ваальса, различные для разных газов].

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = RT$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса для произвольной массы газа
 [$\nu = m/M$ — количество вещества].

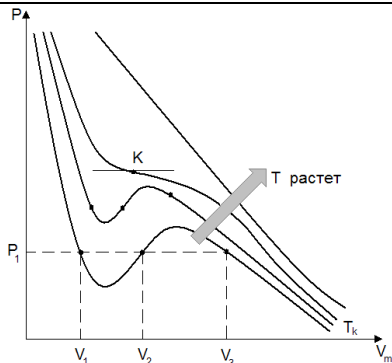
$$\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT$$

На рисунке приведены изотермы Ван-дер-Ваальса — зависимости p от V_m при заданных T , определяемые уравнением Ван-дер-Ваальса для моля газа.

При высокой температуре ($T > T_k$) изотерма реального газа отличается от изотермы идеального газа только некоторым искажением ее формы, оставаясь монотонно спадающей кривой. При некоторой температуре T_k на изотерме имеется лишь одна точка перегиба K . Эта изотерма называется *критической*, соответствующая ей температура T_k — *критической температурой*. Критическая изотерма имеет лишь одну точку перегиба K , называемую *критической точкой*; в этой точке касательная к ней параллельна оси абсцисс. Соответствующие этой точке объем V_k и давление p_k называются также *критическими*.

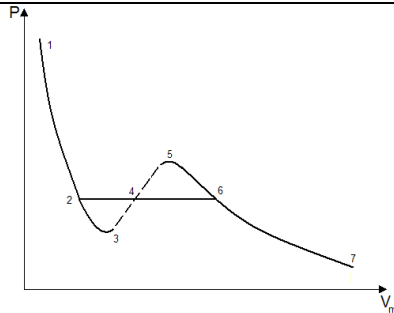
Критическое состояние — состояние с критическими параметрами (p_k, V_k, T_k).

При низкой температуре ($T < T_k$) изотермы имеют волнообразный участок, сначала монотонно опускаясь вниз, затем монотонно поднимаясь вверх и снова монотонно опускаясь.



Уравнение Ван-дер-Ваальса при заданных p и T является уравнением третьей степени относительно V_m ; следовательно, оно может иметь либо три вещественных корня, либо один вещественный и два мнимых, причем физический смысл имеют лишь вещественные положительные корни. Поэтому первому случаю соответствуют изотермы при низких температурах (три значения объема газа V_1, V_2 и V_3 отвечают (символ « m » для простоты опускаем) одному значению давления p_1), второму случаю — изотермы при высоких температурах.

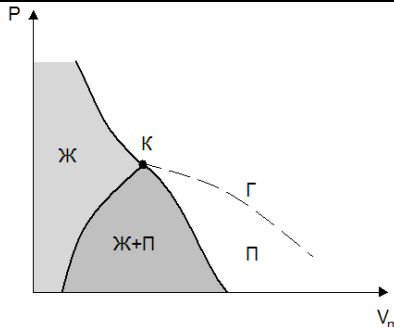
Рассматривая различные участки изотермы при $T < T_k$, видим, что на участках 1—3 и 5—7 при уменьшении объема V_m давление p возрастает. На участке 5—6 сжатие вещества приводит к уменьшению давления; практика же показывает, что такие состояния в природе не осуществляются. Наличие участка 3—5 означает, что при постепенном изменении объема вещество не может оставаться все время в виде однородной среды; в некоторый момент должно наступить скачкообразное изменение состояния и распад вещества на две линии. Таким образом, истинная изотерма имеет вид ломаной линии 7—6—2—1. Часть 7—6 отвечает газообразному состоянию, а часть 2—1 — жидкому. В состояниях, соответствующих горизонтальному участку изотермы 6—2, наблюдается равновесие жидкой и газообразной фаз вещества.



Пар — вещество, находящееся в газообразном состоянии при температуре ниже критической.

Насыщенный пар — пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью.

Если через крайние точки горизонтальных участков семейства изотерм провести линию, то получится колоколообразная кривая, ограничивающая область двухфазных состояний вещества. Эта кривая и критическая изотерма делят диаграмму p, V_m под изотермой на три области: под колоколообразной кривой располагается область двухфазных состояний (жидкость и насыщенный пар), слева от нее находится область жидкого состояния, а справа — область пара. Пар отличается от остальных газообразных состояний тем, что при



изотермическом сжатии его можно подвергнуть сжижению. Газ же при температуре выше критической не может быть превращен в жидкость ни при каком давлении.	
Внутреннее давление (обусловлено силами взаимодействия молекул).	$p' = \frac{a}{V_m^2}$
Формулы, связывающие критические параметры (объем, давление и температуру) с постоянными a и b Ван-дер-Валяса.	$V_{\text{мкр}} = 3b, \quad p_{\text{кр}} = \frac{a}{27b^2},$ $T_{\text{кр}} = \frac{8a}{27Rb}.$

Внутренняя энергия реального газа — кинетическая энергия теплового движения его молекул и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия.

Внутренняя энергия произвольной массы реального газа	$U = \nu \left(C_v T - \frac{a}{V_m} \right)$
---	--

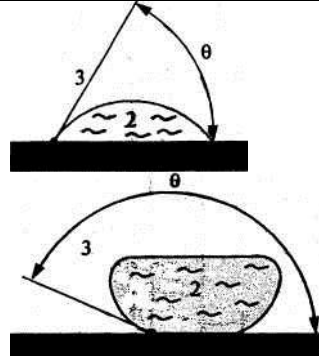
Точка росы — температура, при которой пар переходит в состояние насыщения.

Относительная влажность воздуха — выраженное в процентах отношение парциального давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению p_n насыщенного пара при той же температуре.	$f = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$
--	---------------------------------

Поверхностное натяжение равно силе поверхностного натяжения, приходящейся на единицу длины контура. Поверхностное натяжение может быть также определено как плотность поверхностной энергии [F — сила поверхностного натяжения, действующая на контур l ограничивающий поверхность жидкости; ΔE — поверхностная энергия, связанная с площадью ΔS поверхности пленки].	$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S} = \frac{F}{l}$
Единица поверхностного натяже-	

Поверхностно-активное вещество — вещество, ослабляющее поверхностное натяжение жидкости.

Капля воды растекается на стекле и принимает форму, изображенную на рисунке сверху, в то время как ртуть на той же поверхности превращается в сплюснутую каплю. В первом случае жидкость смачивает твердую поверхность, во втором — не смачивает ее. Смачивание зависит от характера сил, действующих между молекулами поверхностных слоев прикасающихся сред.



Для смачивающей жидкости силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем между молекулами самой жидкости, и жидкость стремится увеличить поверхность соприкосновения с твердым телом.

Для несмачивающей жидкости силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела меньше, чем между молекулами жидкости, и жидкость стремится уменьшить поверхность своего соприкосновения с твердым телом.

Краевой угол — угол θ между касательными к поверхности жидкости и твердого тела.

Избыточное давление для произвольной поверхности жидкости двойкой кривизны (формула Лапласа)

$[R_1$ и R_2 — радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности жидкости. Радиус кривизны положителен, если центр кривизны находится внутри жидкости (*выпуклый мениск*) и отрицателен, если центр кривизны находится вне жидкости (*вогнутый мениск*)].

$$p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Избыточное давление в случае сферической поверхности

$$p = \frac{2\sigma}{R}$$

Капиллярность — явление изменения высоты уровня жидкости в капиллярах (узких трубках). Если жидкость смачивает материал трубки, то внутри нее поверхность жидкости (мениск) имеет вогнутую форму, если не смачивает — выпуклую.

Высота подъема жидкости в капиллярной трубке
[θ — краевой угол, r — радиус капилляра, ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения].

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g R}$$

Кристаллическая решетка — структура, для которой характерно регулярное расположение частиц с периодической повторяемостью в трех измерениях.

Узлы кристаллической решетки — точки, в которых расположены частицы, а точнее точки, относительно которых частицы совершают колебания.

Монокристалл — твердое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решетку.

Поликристалл — твердое тело, имеющее мелкокристаллическую структуру, т. е. состоящее из множества беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен.

Анизотропность — зависимость физических свойств (упругих, механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических) от направления.

Анизотропия монокристаллов объясняется тем, что в металлической решетке различно число частиц, приходящихся на одинаковые по длине, но разные по направлению отрезки, т. е. плотность расположения частиц кристаллической решетки по разным направлениям не одинакова, что и приводит к различию свойств кристалла вдоль этих направлений.

Фаза — термодинамически равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества.

Фазовый переход — переход вещества из одной фазы в другую.

Фазовый переход первого рода (например, плавление, кристаллизация и т. д.) — фазовый переход, сопровождающийся поглощением или выделением теплоты, называемой теплотой фазового перехода.

Характеризуется постоянством температуры, изменениями энтропии и объема.

Фазовый переход второго рода — фазовый переход, не связанный с поглощением или выделением теплоты и изменением объема.

Характеризуется постоянством объема, энтропии и скачкообразным изменением теплоемкости.

<p>Закон Дюлонга и Пти: молярная (атомная) теплоемкость химически простых тел в кристаллическом состоянии одинакова и не зависит от температур [C — молярная (атомная) теплоемкость химически простых твердых тел].</p>	$C_M = \frac{dU_M}{dT} = 3R$
<p>Уравнение Клапейрона—Клаузиуса, позволяющее определить изменение температуры фазового перехода в зависимости от изменения давления при равновесно протекающем процессе [L — теплота фазового перехода, $(V_2 - V_1)$ — изменение объема вещества при переходе его из первой фазы во вторую, T — температура перехода (процесс изотермический)].</p>	$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}$

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. *Определить число N молекул, содержащихся в объеме $V = 1$ мм³ воды, и массу m_0 молекулы воды. Считая условно, что молекулы воды имеют вид шариков, соприкасающихся друг с другом, найти диаметр d молекул.*

Решение. Число N молекул, содержащихся в некоторой системе массой m , равно произведению постоянной Авогадро N_A на количество вещества ν :

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

где M — молярная масса.

Выразив в этой формуле массу как произведение плотности на объем V , получим

$$N = \frac{\rho V N_A}{M}.$$

Произведем вычисления, учитывая, что $M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль:

$$N = \frac{10^3 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ молекул} = 3,34 \cdot 10^{19} \text{ молекул}.$$

Масса m_0 одной молекулы

$$m_0 = \frac{M}{N_A}. \quad (1)$$

Подставив в (1) значения M и N_A , найдем массу молекулы воды:

$$m_0 = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ кг} .$$

Если молекулы воды плотно прилегают друг к другу, то можно считать, что на каждую молекулу приходится объем (кубическая ячейка) $V_0 = d^3$, где d – диаметр молекулы. Отсюда

$$d = \sqrt[3]{V_0} . \quad (2)$$

Объем V_0 найдем, разделив молярный объем V_m на число молекул в моле, т. е. на N_A :

$$V_0 = \frac{V_m}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A} . \quad (3)$$

Подставим выражение (3) в (2):

$$d = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}} . \quad (4)$$

Проверим, дает ли правая часть выражения (4) единицу длины:

$$\left\{ \frac{[M]}{[\rho][N_A]} \right\}^{1/3} = \left\{ \frac{1 \text{ кг/м}^3}{1 \text{ кг/м}^3 \cdot 1 \text{ моль}^{-1}} \right\}^{1/3} = 1 \text{ м} .$$

Произведем вычисления:

$$d = \sqrt[3]{\frac{18 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}} \text{ м} = 3,11 \cdot 10^{-10} \text{ м} .$$

Пример 2. Чему равны средние кинетические энергии поступательного и вращательного движения всех молекул, содержащихся в $m = 2$ кг водорода при температуре $T = 400$ К?

Решение: Считаем водород идеальным газом. Молекула водорода – двухатомная, связь между атомами считаем жесткой, т.е. колебательных степеней свободы не учитываем, тогда число степеней свободы молекулы водорода $i = 5$. В среднем на одну степень свободы приходится энергия $\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{1}{2} kT$, где k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура.

Поступательному движению приписывается три ($i_n = 3$), а вращательному движению двухатомной молекулы – две ($i_{вр} = 2$) степени свободы. Средние энергии:

$$\langle \varepsilon_{ном} \rangle = \frac{3}{2} kT, \quad \langle \varepsilon_{вр} \rangle = \frac{2}{2} kT .$$

Число молекул, содержащихся в произвольной массе газа, $N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A$, где ν – число молей, N_A – постоянная Авогадро.

Тогда средняя кинетическая энергия поступательного движения всех молекул водорода будет равна:

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = \frac{3}{2} kT \cdot N = \frac{3m}{2M} RT, \quad (1)$$

где $R = kN_A$ – молярная газовая постоянная.

Аналогично средняя кинетическая энергия вращательного движения молекул водорода

$$\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = \frac{m}{M} RT. \quad (2)$$

Подставляя числовые значения в формулы (1) и (2), имеем

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = 4,99 \cdot 10^6 \text{ Дж},$$

$$\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = 3,32 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Пример 3. Определить среднюю длину свободного пробега и среднее число столкновений за 1с молекулы кислорода, находящегося в сосуде емкостью $V = 2$ л при температуре $t = 27^\circ\text{C}$ и давлении $p = 100$ кПа.

Решение. Средняя длина свободного пробега молекул вычисляется по формуле

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n},$$

где d – эффективный диаметр молекулы кислорода находим из таблиц, $d = 0,29$ нм; n – число молекул в единице объема, которое можно определить из уравнения $p = nkT$

$$\langle l \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p}.$$

Среднее число соударений молекулы за 1с равно

$$\langle z \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle l \rangle},$$

где $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекулы

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}.$$

Подставляя числовые значения, находим

$$\langle l \rangle = 3,56 \cdot 10^{-8} \text{ м}, \quad \langle z \rangle = 1,25 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}.$$

Пример 4. Определить удельные теплоемкости при постоянном объеме c_V и при постоянном давлении c_p неона и водорода, принимая эти газы за идеальные.

Решение. Удельные теплоёмкости идеальных газов выражаются формулами

$$c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{M} \quad \text{и} \quad c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M} \quad ,$$

где i – число степеней свободы молекулы газа, M – молярная масса. Для неона (одноатомный газ) $i_1 = 3$, $M_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Подставив значения i_1 , M_1 , R и произведя вычисления, найдем:

$$c_{V1} = 624 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \quad c_{p1} = 1,04 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Для водорода (двухатомный газ) $i_2 = 5$, $M_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Вычисление даёт следующие значения^

$$c_{V2} = 10,4 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \quad c_{p2} = 14,6 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Пример 5. Кислород массой $m = 160$ г нагревают при постоянном давлении от $T_1 = 320$ К до $T_2 = 340$ К. Определить количество теплоты, поглощенное газом, изменение внутренней энергии и работу расширения газа.

Решение: Количество теплоты, необходимое для нагревания газа при постоянном давлении,

$$Q = mc_p(T_2 - T_1) = \frac{m}{M} C_p(T_2 - T_1). \quad (1)$$

Здесь c_p и $C_p = Mc_p$ – удельная и молярная теплоемкости газа при постоянном давлении, $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса кислорода. Для всех двухатомных газов $\tilde{N}_d = \frac{7}{2} R$; $C_p = 29,09$ Дж/(моль К).

Изменение внутренней энергии газа находим по формуле

$$\Delta U = \frac{m}{M} C_V(T_2 - T_1), \quad (2)$$

где C_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме. Для всех двухатомных газов $\tilde{N}_V = \frac{5}{2} R$, $C_V = 20,78$ Дж/(моль К).

Работа расширения газа при изобарном процессе $\dot{A} = \delta \Delta V$, где $\Delta V = V_2 - V_1$ – изменение объема газа, которое можно найти из уравнения Клапейрона – Менделеева.

При изобарном процессе

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1, \quad (3)$$

$$pV_2 = \frac{m}{M} RT_2. \quad (4)$$

Вычитая выражения (4) из (3), находим

$$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1),$$

следовательно,

$$A = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1). \quad (5)$$

Подставляя числовые значения в формулы (1), (2) и (5), получаем,
 $Q = 2,91$ кДж; $\Delta U = 2,08$ кДж; $A = 831$ Дж.

Пример 6. Объем аргона, находящегося при давлении $p = 80$ кПа, увеличился от $V_1 = 1$ л до $V_2 = 2$ л. На сколько изменится внутренняя энергия газа, если расширение производилось: а) изобарно; б) адиабатно?

Решение: Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R \Delta T \quad (1).$$

зависит от характера процесса, при котором идет расширение газа. Найти ΔU по формуле (1) нельзя, так как масса газа и температура в условии задачи не даны. Поэтому необходимо провести преобразование формулы (1). Запишем уравнение Клапейрона - Менделеева для начального и конечного состояний газа:

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1 \quad \text{и} \quad pV_2 = \frac{m}{M} RT_2$$

или, вычитая уравнения,

$$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1). \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$\Delta U = \frac{i}{2} p(V_2 - V_1). \quad (3)$$

При адиабатном расширении газа теплообмена с внешней средой не происходит, поэтому $Q = 0$. Первый закон термодинамики $Q = \Delta U + A$ запишется в виде

$$0 = \Delta U + A,$$

откуда

$$\Delta U = -A. \quad (4)$$

Работа, совершаемая газом в адиабатном процессе

$$A = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right], \quad (5)$$

где γ – показатель адиабаты, равный отношению теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i + 2}{i}.$$

Для аргона – одноатомного газа число степеней свободы $i = 3$, поэтому $\gamma = 1,67$.

Находим изменение внутренней энергии при адиабатном процессе, учитывая формулы (4) и (5):

$$\Delta U = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} - 1 \right]. \quad (6)$$

Формулу (6) следует преобразовать, учитывая при этом параметры, данные в условии задачи. Применяя уравнение Клапейрона - Менделеева для данного случая $p_1 V_1 = (m/M)RT_1$, получим

$$\Delta U = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} - 1 \right].$$

Подстановка числовых значений дает

а) при изобарном расширении

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 121 \text{ Дж},$$

б) при адиабатном расширении

$$\Delta U = \frac{0,8 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{(1,67 - 1)} \left[\left(\frac{10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,67-1} - 1 \right] = -44,6 \text{ Дж}.$$

Пример 7. Определить изменение ΔS энтропии при изотермическом расширении азота массой $m = 10 \text{ г}$, если давление газа уменьшилось от $p_1 = 1,1 \text{ МПа}$ до $p_2 = 50 \text{ кПа}$.

Решение. Так как процесс изотермический, то в выражении изменения энтропии

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

температуру выносят за знак интеграла.

$$\Delta S = \frac{1}{T} \int_1^2 dQ = \frac{Q}{T}. \quad (1)$$

Согласно первому началу термодинамики, количество теплоты, полученное газом, $Q = A + \Delta U$. Для изотермического процесса $\Delta U = 0$, поэтому $Q = A$.

Работа A газа в изотермическом процессе

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), найдем искомое изменение энтропии

$$\Delta S = \frac{m}{M} R \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Вычисляя, получим $\Delta S = 2,06 \text{ Дж/К}$.

Пример 8. Найти добавочное давление внутри мыльного пузыря диаметром $d = 10$ см. Какую работу нужно совершить, чтобы выдуть этот пузырь?

Решение. Пленка мыльного пузыря имеет две сферические поверхности: внешнюю и внутреннюю. Обе поверхности оказывают давление на воздух, заключенный внутри пузыря. Так как толщина пленки чрезвычайно мала, то диаметры обеих поверхностей практически одинаковы. Поэтому добавочное давление

$$\Delta p = 2 \frac{2\sigma}{r},$$

где r – радиус пузыря. Так как $r = \frac{d}{2}$, то $\Delta p = \frac{8\sigma}{d}$.

Работа, которую нужно совершить, чтобы, растягивая пленку, увеличить ее поверхность на ΔS , выражается формулой

$$A = \sigma \Delta S = \sigma(S - S_0). \quad (1)$$

В данном случае S – общая площадь двух сферических поверхностей пленки мыльного пузыря; S_0 – общая площадь двух поверхностей плоской пленки, затягивавшей отверстие трубки до выдувания пузыря.

Пренебрегая S_0 , получаем

$$A = \sigma S = 2\pi d^2 \sigma.$$

Произведем вычисления:

$$\Delta p = 3,2 \text{ Па}, A = 2 \cdot 3,14 \cdot (0,1)^2 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 2,5 \text{ мДж}.$$

ПРИЛОЖЕНИЯ

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Единицы физических величин (СИ)

Величина	Единица		Выражение через основные единицы
	наименование	обозначение	
<i>Основные единицы</i>			
Длина	метр	м	
Масса	килограмм	кг	
Время	секунда	с	
Сила электрического тока	ампер	А	
Термодинамическая температура	кельвин	К	
Количество вещества	моль	моль	
Сила света	кандела	кд	
<i>Дополнительные единицы</i>			

Плоский угол	радиан	рад	
Телесный угол	стерадиан	ср	
<i>Производные единицы</i>			
Частота	герц	Гц	c^{-1}
Сила, вес	ньютон	Н	$м \cdot кг \cdot c^{-2}$
Давление, механическое напряжение	паскаль	Па	$м^{-1} \cdot кг \cdot c^{-2}$
Робота, энергия, количество теплоты	джоуль	Дж	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-2}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-3}$
Электрический заряд	кулон	Кл	$c \cdot A$
Потенциал электрического поля, электрическое напряжение	вольт	В	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая емкость	фарад	Ф	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot c^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	сименс	См	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2$
Магнитная индукция	тесла	Тл	$кг \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитный поток	вебер	Вб	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность	генри	Гн	$м^2 \cdot кг \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Световой поток	люмен	лм	кд·ср
Освещенность	люкс	лк	$м^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активность изотопа	беккерель	Бк	c^{-1}
Поглощенная доза излучения	грей	Гр	$м^2 \cdot c^{-2}$

2. Множители и приставки

Множитель	Приставка				Множитель	Приставка			
	Наименование	Значение	Пример			Наименование	Обозначение	Пример	
10^8	экса	Е	эксаметр	Ем	10^{-1}	деци	д	дециметр	дм
10^5	пэта	П	пэтагерц	ПГц	10^{-2}	санτι	с	сантиметр	см
10^4	тера	Т	тераджоуль	ТДж	10^{-3}	милли	м	миллиампер	мА
10^9	гига	Г	гиганьютон	ГН	10^{-6}	микро	мк	микровольт	мкВ
10^6	мега	М	мегаом	МОм	10^{-9}	нано	н	наносекунда	нс
10^3	кило	к	километр	км	10^{-12}	пико	п	пикофарад	пф
10^2	гекто	г	гектоватт	гВ	10^{-15}	фемто	ф	фемто-	фг

							грамм		
10 ¹	дека	да	декалитр	дал	10 ⁻¹⁸	атто	а	аттокулон	аК л

3. Основные физические постоянные (округленные значения)

<i>Физическая постоянная</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Значение</i>
Нормальное ускорение свободного падения	g	9,81 м/с ²
Гравитационная постоянная	G	6,67·10 ⁻¹¹ м ³ /(кг·с ²)
Постоянная Авогадро	N _A	6,02·10 ²³ моль ⁻¹
Молярная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль·К)
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	V _{0m}	22,4·10 ⁻³ м ³ /моль
Постоянная Больцмана	k	1,38·10 ⁻²³ Дж/К
Элементарный заряд	e	1,60·10 ⁻¹⁹ Кл
Скорость света в вакууме	c	3,00·10 ⁸ м/с
Постоянная Стефана–Больцмана	σ	5,67·10 ⁻⁸ Вт/(м ² К ⁴)
Постоянная закона смещения Вина	b	2,90·10 ⁻³ м·К
Постоянная Планка	h	6,63·10 ⁻³⁴ Дж·с
	ħ	1,05·10 ⁻³⁴ Дж·с
Постоянная Ридберга	R	1,10·10 ⁷ м ⁻¹
Радиус Бора	a ₀	0,529·10 ⁻¹² м
Комптоновская длина волны электрона	λ	2,43·10 ⁻¹² м
Магнетон Бора	μ _B	0,927·10 ⁻²³ А·м ²
Энергия ионизации атома водорода	E _i	2,18·10 ⁻¹⁸ Дж (13,6 эВ)
Атомная единица массы	а. е. м.	1,660·10 ⁻²⁷ кг
Электрическая постоянная	ε ₀	8,85·10 ⁻¹² Ф/м
Магнитная постоянная	μ ₀	4π·10 ⁻⁷ Гн/м

4. Плотность твердых тел

<i>Твердое тело</i>	<i>ρ, кг/м³</i>	<i>Твердое тело</i>	<i>ρ, кг/м³</i>	<i>Твердое тело</i>	<i>ρ, кг/м³</i>
Алюминий	2,70·10 ³	Железо	7,88·10 ³	Свинец	11,3·10 ³
Барий	3,50·10 ³	Литий	0,53·10 ³	Серебро	10,5·10 ³
Ванадий	6,02·10 ³	Медь	8,93·10 ³	Цезий	1,90·10 ³
Висмут	9,80·10 ³	Никель	8,90·10 ³	Цинк	7,15·10 ³

5. Плотность жидкостей

<i>Жидкость</i>	ρ , кг/м ³	<i>Жидкость</i>	ρ , кг/м ³
Вода (при 4°С)	$1,00 \cdot 10^3$	Сероуглерод	$1,26 \cdot 10^3$
Глицерин	$1,26 \cdot 10^3$	Спирт	$0,80 \cdot 10^3$
Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$		

6. Плотность газов (при нормальных условиях)

<i>Газ</i>	ρ , кг/м ³	<i>Газ</i>	ρ , кг/м ³
Водород	0,09	Гелий	0,18
Воздух	1,29	Кислород	1,43

7. Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей

<i>Жидкость</i>	σ , мН/м	<i>Жидкость</i>	σ , мН/м
Вода	72	Ртуть	500
Мыльная вода	40	Спирт	22

8. Эффективный диаметр молекулы

<i>Газ</i>	$d_{\text{эфф}}$, м	<i>Газ</i>	$d_{\text{эфф}}$, м
Азот	$3,0 \cdot 10^{-10}$	Гелий	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Водород	$2,3 \cdot 10^{-10}$	Кислород	$2,7 \cdot 10^{-10}$

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М., «Академия», 2005, 560 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. К.; «Техніка», 1999, – 536 с. Т.2. Електрика і магнетизм. К.; «Техніка», 2001, – 452 с. Т.3. Оптика. Квантова фізика. К.; «Техніка», 1999, – 520 с.
3. Чертов А.Г. Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: «Физмат лит», 2005 – 640 с.
4. Гаркуша І.П., Горбачук І.Т., Курінний В.П. та ін. Загальний курс фізики: Збірник задач. – К.: «Техніка», 2004, – 560 с.

Дополнительная

5. Савельев И.В. Курс физики. В 3-х т. Т 1: Механика. Молекулярная физика. – М.: «Наука», 1989, – 352с., Т.2: Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. М.: «Наука», 1989, – 464с. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: «Наука», 1989, – 304с.
6. Иродов И.Е. Механика. Основные законы. М. «Лаборатория базовых знаний». 2005.– 309 с. Физика макросистем. Основные законы. М.

- «Лаборатория базовых знаний».2001.– 208 с. Электромагнетизм. Основные законы. М. «Лаборатория базовых знаний».2002.– 320 с. Волновые процессы. М. «Лаборатория базовых знаний». 2005.– 309 с. Квантовая физика. Основные законы. М. «Лаборатория базовых знаний».2004.– 256 с.
7. Чолпан П.П. Фізика: К.: «Вища шк.», 2004.– 567с.
 8. Зачек І.Р., Кравчук І.М, Романишин Б.М. та ін. Курс фізики. Під ред. І.Є.Лопатинського – Львів, „Бескід Біт”, 2002, – 376 с.
 9. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М. «Высш. шк.», 1989, – 609 с.
 10. Яворский Б.М, Детлаф А.А., Справочник по физике. М., «Наука», 1985, – 512 с.
 11. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. т.1,2. – М. «Дрофа».2003, 398 с. 431 с.
 12. Геворкян Р.Г., Шепель В.В. Курс общей физики. – М.: «Высш. шк.» , 1972, – 599 с.
 13. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики.– СПб.: «Книжный мир», 2005.– 328 с.
 14. Трофимова Т.И., Павлова З.Г.. Сборник задач по курсу физики с решениями. М.: «Высш. шк.», 1999. – 591 с.
 15. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – М.: «Наука», 1977-1980.– Т. 1, 2, 3, 4.