

2. Молекулярная физика и термодинамика

7. Распределение Максвелла и Больцмана.

Формула Больцмана $n = n_0 e^{-\frac{W_p}{kT}}$ характеризует распределение частиц, находящихся в состоянии хаотического теплового движения, в потенциальном силовом поле, в частности распределение молекул по высоте в изотермической атмосфере. Соотнесите рисунки и соответствующие им утверждения.

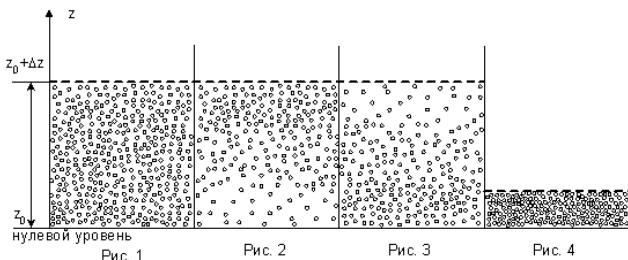


Рис.3. Распределение молекул воздуха в атмосфере Земли.

Рис.4. Распределение молекул в силовом поле при температуре $T \rightarrow 0$.

Рис.2 Распределение молекул не является больцмановским и описывается

функцией $n = n_0 e^{\frac{W_p}{kT}}$.

Рис.1. Распределение молекул в силовом поле при очень высокой температуре, когда энергия хаотического теплового движения значительно превосходит потенциальную энергию молекул.

Д) Распределение молекул по кинетическим энергиям

Концентрация молекул в однородном поле силы тяжести убывает с высотой по

закону $n = n_0 e^{-\frac{Mgz}{RT}} = n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}}$ (распределение Больцмана на рис. 3), где n – концентрация молекул на высоте z , n_0 – концентрация молекул на высоте $z_0 = 0$, M – молярная масса, m – масса молекулы, g – ускорение свободного падения, R – универсальная газовая постоянная, k – постоянная Больцмана, T – температура. В предельных случаях:

если $T \rightarrow \infty$, то $n \rightarrow n_0$ и молекулы равномерно распределяются по высоте (рис. 1);

если $T \rightarrow 0$, то $n \rightarrow 0$ и молекулы располагаются на нулевом уровне (рис. 4). Если число молекул, имеющих большую потенциальную энергию, увеличивается по

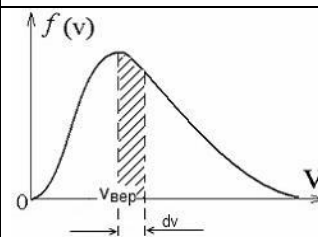
экспоненциальному закону $n = n_0 e^{\frac{W_p}{kT}}$, то такое распределение можно назвать «антибольцмановским», или инверсным (рис. 2)

На рисунке представлен график функции распределения молекул кислорода по скоростям (распределение Максвелла) для температуры $T=273$ К, при

скорости 380 м/с функция достигает

максимума. Здесь $f(v) = \frac{dP}{dv} = \frac{dN}{Ndv}$ –

плотность вероятности или доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $v + dv$ в расчете на единицу этого интервала. Для распределения Максвелла справедливы утверждения, что ...

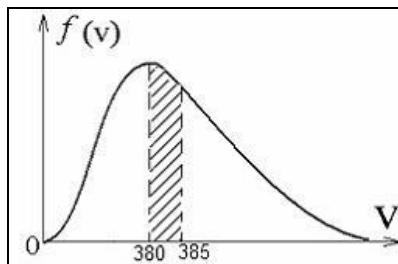


Функция $f(v)$ распределения

Максвелла $f(v)$ имеет смысл плотности

вероятности $f(v) = \frac{dP}{dv} = \frac{dN}{Ndv}$, где $\frac{dN}{N}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале от v до $v + dv$. В нашем случае

$dv = 5 \text{ м/с}$ вблизи $v_{верп} = 380 \text{ м/с}$ – наиболее вероятной скорости молекул, близкой к которой движется большее число молекул. dN – число молекул, скорости которых заключены в интервале



- отлична от нуля вероятность того, что молекула кислорода при $T=273\text{ K}$ имеет скорость, точно равную 380 м/с
- с понижением температуры площадь под кривой уменьшается
- с ростом температуры наиболее вероятная скорость молекул увеличится
- площадь заштрихованной полоски равна доле молекул со скоростями в интервале от $v_1 = 380\text{ м/с}$ до $v_2 = 385\text{ м/с}$ или вероятности того, что скорость молекулы имеет значение в этом интервале скоростей

от 380 м/с до 385 м/с , N – число всех молекул газа. Площадь заштрихованной

$$S_{\text{заштрихованной}} = \int_v^{v+dv} f(v)dv = dP = \frac{dN}{N}$$

полоски

определяет долю молекул, скорости которых

заключены в интервале от 380 м/с до 385 м/с . С ростом температуры максимум кривой смещается вправо, высота максимума убывает.

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

Наиболее вероятная скорость зависит от температуры газа: она увеличивается с повышением температуры. Вероятность того, что величина скорости может принять хотя бы какое-нибудь значение (достоверное событие),

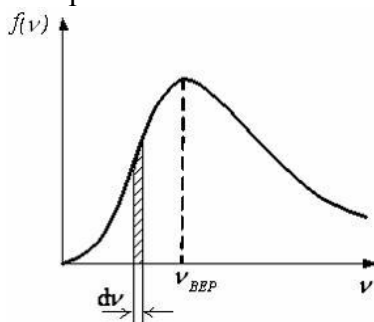
$$\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$$

равна единице, поэтому при изменении температуры площадь под кривой остается равной единице. Если точно задана

скорость ($v_{\text{вер}} = 380, (0)\text{ м/с}$), то $dv = 0$, следовательно, вероятность $dP = 0$.

На рисунке представлен график функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла),

где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $v + dv$ в расчете на единицу этого интервала.



Для этой функции является верным утверждение, что ...

1. с увеличением температуры величина максимума функции увеличивается
2. при изменении температуры положение максимума не изменяется
3. при изменении температуры площадь под кривой не изменяется
4. с уменьшением температуры величина максимума функции уменьшается

Полная вероятность равна: $\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$, т.е. площадь, ограниченная кривой распределения Максвелла, равна единице и при изменении температуры не изменяется. Из формулы

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

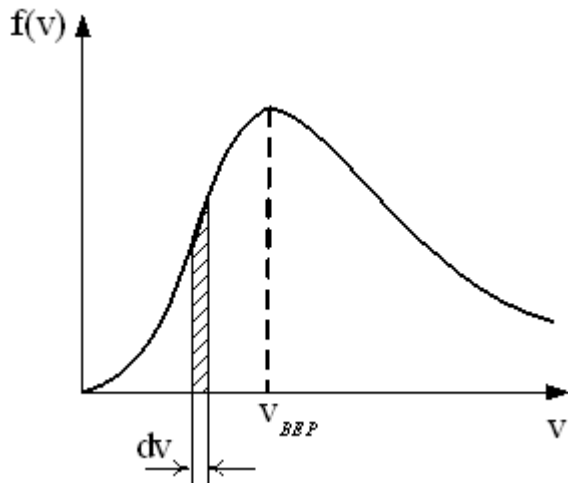
наиболее вероятной скорости

которой функция $f(v)$ максимальна, следует, что при повышении температуры максимум функции сместится вправо

На рисунке представлен график функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла),

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv}$$

где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $v + dv$ в расчете на единицу этого интервала.



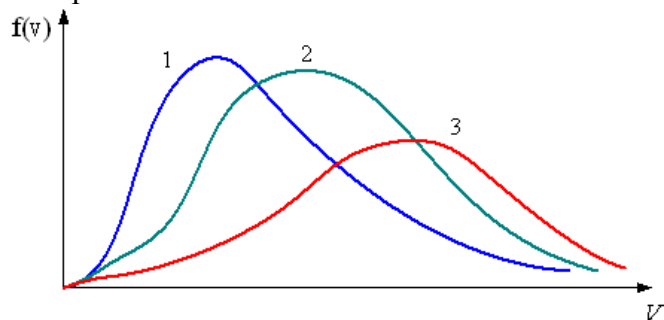
Если, не меняя температуры взять другой газ с меньшей молярной массой и таким же числом молекул, то ...

- максимум кривой сместится вправо
- площадь под кривой не изменится
- высота максимума увеличится
- площадь под кривой уменьшится

На рисунке представлены графики функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла),

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv}$$

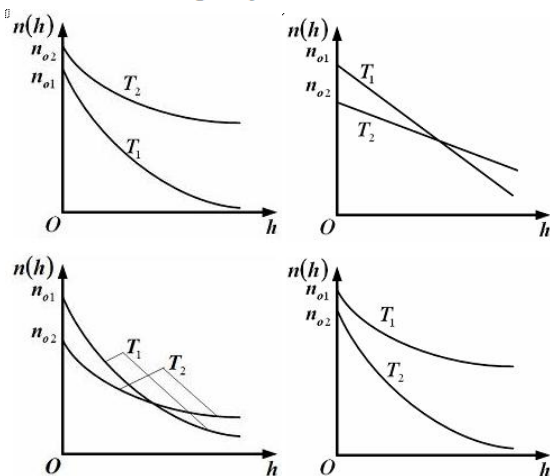
где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $v + dv$ в расчете на единицу этого интервала.



Для этих функций верными являются утверждения, что ...

- распределение 1 соответствует газу, имеющему наибольшую массу молекул
- распределение 3 соответствует газу, имеющему наибольшую температуру
- распределение 1 соответствует газу, имеющему наименьшую массу молекул
- распределение 3 соответствует газу, имеющему наименьшую температуру

Зависимость концентрации молекул идеального газа во внешнем однородном поле силы тяжести от высоты для двух разных температур ($T_2 > T_1$) представлена на рисунке ...



Зависимость концентрации молекул идеального газа от высоты h для некоторой температуры T определяется распределением Больцмана:

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{kT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{W_p}{kT}\right), \text{ где } n_0 -$$

концентрация молекул на высоте $h = 0$, m_0 - масса

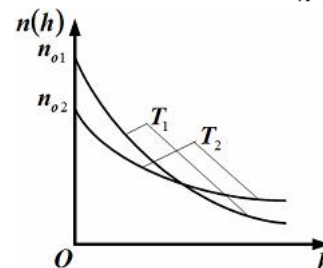
молекулы, g - ускорение свободного падения, k -

постоянная Больцмана. Из формулы следует, что при постоянной температуре концентрация газа больше там, где меньше потенциальная энергия его молекул W_p , и

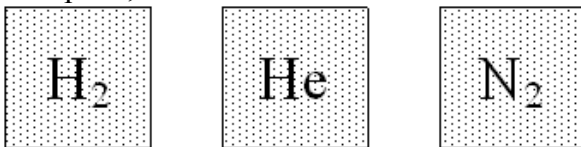
уменьшается с высотой по экспоненциальному закону тем медленнее, чем больше температура: $T_2 > T_1$. С

повышением температуры из-за увеличения энергии хаотического теплового движения молекулы более равномерно распределяются по высоте, и поэтому концентрация молекул газа на «нулевом уровне» ($h = 0$)

уменьшается, а на высоте h увеличивается.



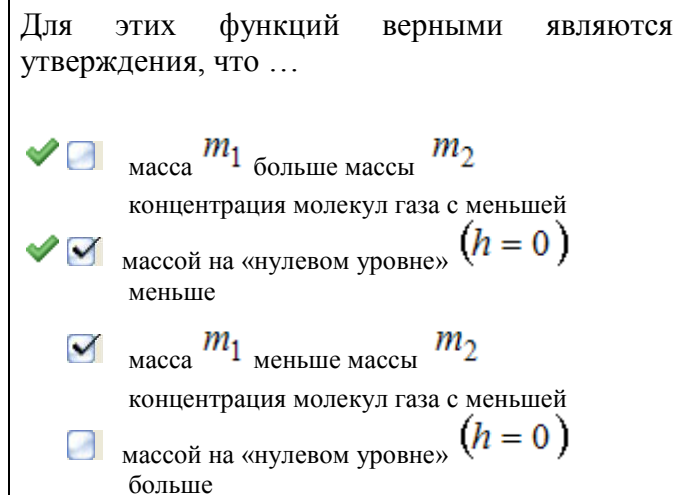
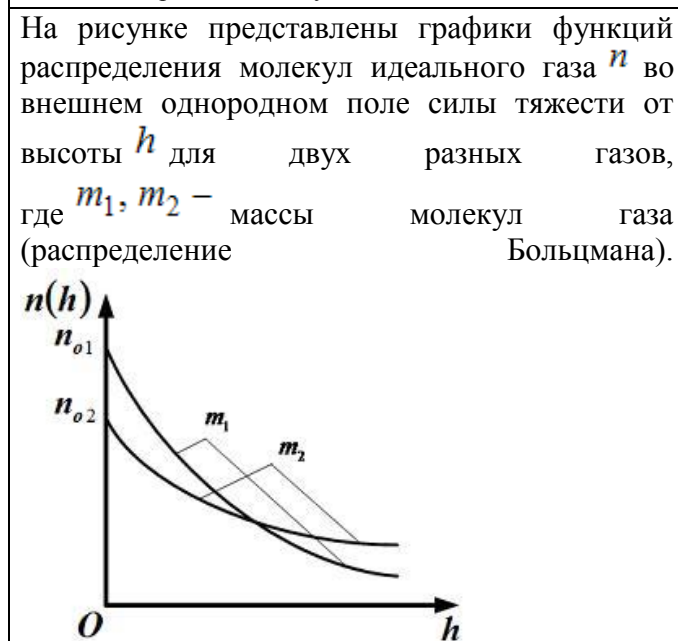
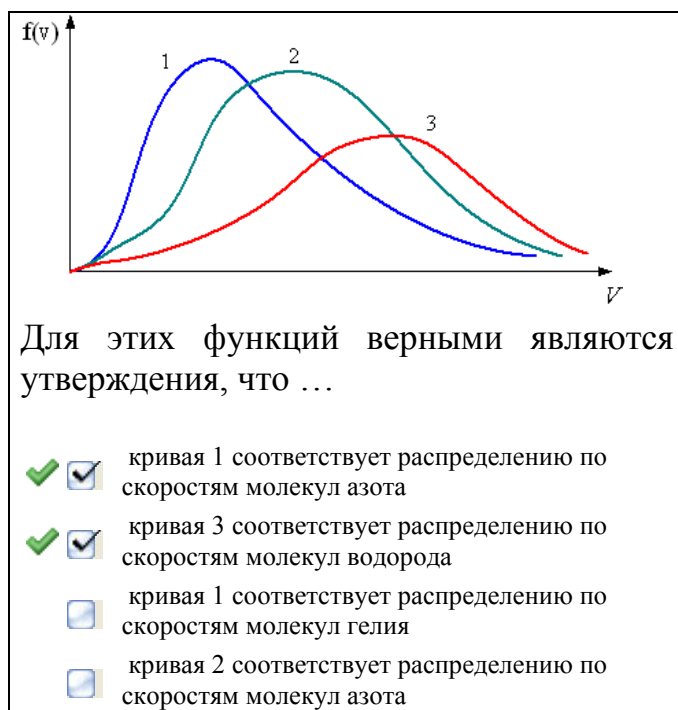
В трех одинаковых сосудах при равных условиях находится одинаковое количество водорода, гелия и азота



На рисунке представлены графики функций распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла),

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv}$$

где $f(v)$ - доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $v + dv$ в расчете на единицу этого интервала.



На рисунке представлен график функции распределения молекул идеального газа по

Зависимость концентрации молекул идеального газа от высоты h для некоторой температуры T определяется распределением Больцмана:

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 gh}{kT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{W_p}{kT}\right),$$

где n_0 – концентрация молекул на высоте $h = 0$, m_0 – масса молекулы, g – ускорение свободного падения, k – постоянная Больцмана. Из формулы следует, что при постоянной температуре концентрация газа больше там, где меньше потенциальная энергия его молекул W_p , и уменьшается с высотой по экспоненциальному закону. При одной и той же температуре молекулы, имеющие меньшую массу, более равномерно распределяются по высоте, и поэтому концентрация молекул газа на «нулевом уровне» ($h = 0$) уменьшается, а на высоте h увеличивается.

Зависимость концентрации молекул идеального газа от высоты h для некоторой температуры T определяется распределением Больцмана:

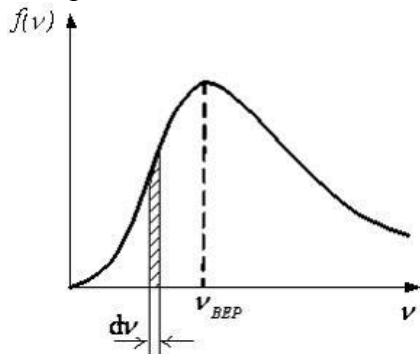
$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 gh}{kT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{W_p}{kT}\right),$$

где n_0 – концентрация молекул на высоте $h = 0$, m_0 – масса молекулы, g – ускорение свободного падения, k – постоянная Больцмана. Из формулы следует, что при постоянной температуре концентрация газа больше там, где меньше потенциальная энергия его молекул W_p , и уменьшается с высотой по экспоненциальному закону. При одной и той же температуре молекулы, имеющие меньшую массу, более равномерно распределяются по высоте, и поэтому концентрация молекул газа на «нулевом уровне» ($h = 0$) уменьшается, а на высоте h увеличивается.

скоростям (распределение Максвелла),

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv}$$

где $f(v)$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $v + dv$ в расчете на единицу этого интервала.



Для этой функции **неверными** являются утверждения, что ...

- при понижении температуры величина максимума функции уменьшается
- при понижении температуры площадь под кривой уменьшается
- с ростом температуры наиболее вероятная скорость молекул увеличивается
- положение максимума кривой зависит не только от температуры, но и от природы газа

8. Средняя энергия молекул.

Кинетическая энергия вращательного движения всех молекул в 2 г водорода при температуре 100 К равна...

Средняя кинетическая энергия одной молекулы

равна $\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT$, где k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура, i – сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы

молекулы $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вр}} + 2n_{\text{колеб}}$.

Молекула водорода H_2 имеет 2 вращательные степени свободы,

следовательно, $\langle E_{\text{вр}} \rangle = \frac{2}{2} kT = kT$. В 2 г

водорода содержится $N = \frac{m}{M} N_A$ молекул,

где m – масса газа, M – молярная масса

водорода, N_A – число Авогадро. Кинетическая энергия вращательного движения всех молекул будет равна:


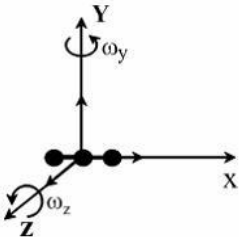
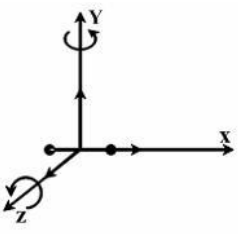
$$W_{\text{вр}} = \frac{m}{M} N_A kT = \frac{m}{M} RT = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 100 = 831 \text{ Дж}$$

Уравнение кинетической теории для давления

Давление газа обусловлено ударами молекул о стенку сосуда и определяется средним

| | |
|---|---|
| <p>идеального газа имеет вид $p = \frac{2}{3}n \langle E \rangle$, где n - концентрация молекул. Для газа водорода $\langle E \rangle$ равно ...</p> | <p>значением кинетической энергии поступательного движения молекул, а значит, поступательными степенями свободы $i_{\text{пост.}} = 3$. Следовательно, и не зависит от вида газа.</p> |
| <p>Если для многоатомных молекул газа при температурах $10^2 K$ вклад энергии колебания ядер в теплоемкость газа пренебрежимо мал, то из предложенных ниже идеальных газов (водород, азот, гелий, водяной пар) изохорную теплоемкость $C_V = 3R$ (универсальная газовая постоянная) имеет один моль ...</p> <p>Ответ: водяной пар</p> <p>Варианты ответа:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) азота 2) водяного пара 3) гелия 4) водорода | <p>Молярная теплоемкость газа при изохорном процессе равна $C_V = \frac{i}{2}R$, где по условию задачи число степеней свободы $i = i_{\text{пост.}} + i_{\text{вращ.}}$. В нашем случае $3R = \frac{i}{2}R$, следовательно, $i = 6$. Максимальное число поступательных степеней свободы равно 3, значит, $6 = 3_{\text{пост.}} + 3_{\text{вращ.}}$. Это возможно, когда газ имеет более двух атомов в нелинейной молекуле. Из предложенных газов это водяной пар.</p> |
| <p>Средняя кинетическая энергия молекул газа при температуре T зависит от их конфигурации и структуры, что связано с возможностью различных видов движения атомов в молекуле и самой молекулы. При условии, что имеет место поступательное, вращательное движение молекулы как целого и колебательное движение атомов в молекуле, средняя кинетическая энергия молекулы кислорода (O_2) равна ...</p> <p><input checked="" type="radio"/> $\frac{7}{2}kT$</p> <p><input type="radio"/> $\frac{3}{2}kT$</p> <p><input checked="" type="radio"/> $\frac{5}{2}kT$</p> <p><input type="radio"/> $\frac{1}{2}kT$</p> | <p>Для статистической системы в состоянии термодинамического равновесия на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная $\frac{kT}{2}$, а на каждую колебательную степень - kT. Средняя кинетическая энергия молекулы равна: $\langle E \rangle = \frac{i}{2}kT$. Здесь i - сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы: $i = n_{\text{пост.}} + n_{\text{вр.}} + 2n_{\text{колеб}}$, где $n_{\text{пост.}}$ - число степеней свободы поступательного движения, равное 3; $n_{\text{вр.}}$ - число степеней свободы вращательного движения, которое может быть равно 0, 2, 3; $n_{\text{колеб}}$ - число степеней свободы колебательного движения, минимальное количество которых равно 1. Для молекулярного кислорода (двухатомной молекулы) $n_{\text{пост.}} = 3$, $n_{\text{вр.}} = 2$ и $n_{\text{колеб}} = 1$. Следовательно, $i = 3 + 2 + 2 = 7$. Тогда средняя энергия молекулы кислорода (O_2) равна: $\langle E \rangle = \frac{7}{2}kT$.</p> |
| <p>Если не учитывать колебательные движения в</p> | <p>Средняя кинетическая энергия молекулы</p> |

| | |
|---|---|
| <p>молекуле водяного пара, то отношение кинетической энергии вращательного движения к полной кинетической энергии молекулы равно ...</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> $\frac{1}{2}$</p> <p><input type="checkbox"/> $\frac{2}{5}$</p> <p><input type="checkbox"/> $\frac{2}{7}$</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> $\frac{1}{3}$</p> <p>Решение:</p> | <p>$\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT$, где k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура, i – сумма числа поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы: $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вр}} + 2n_{\text{колеб}}$. Для молекулы водяного пара (H_2O) число степеней свободы поступательного движения $n_{\text{пост}} = 3$, вращательного – $n_{\text{вр}} = 3$, колебательного – $n_{\text{кол}} = 0$, поэтому $i = 3 + 3 + 0 = 6$. Следовательно, средняя кинетическая энергия молекулы H_2O равна $\langle E \rangle = \frac{6}{2} kT$. Средняя энергия вращательного движения $\langle E_{\text{вр}} \rangle = \frac{3}{2} kT$ и $\frac{\langle E_{\text{вр}} \rangle}{\langle E \rangle} = \left(\frac{3}{2} kT \right) / \left(\frac{6}{2} kT \right) = \frac{1}{2}$ составляет части от полной энергии.</p> |
| <p>На каждую степень свободы движения молекулы приходится одинаковая энергия, равная $\frac{1}{2} kT$ (к-постоянная Больцмана, T – температура по шкале Кельвина). Средняя кинетическая энергия атомарного водорода равна ... Ответ</p> <p>Варианты ответа:</p> <p>1. $\frac{5}{2} kT$ 2. $\frac{1}{2} kT$ 3. $3kT$ 4. $\frac{3}{2} kT$</p> | <p>Средняя кинетическая энергия молекулы равна $\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT$, где i – число степеней свободы молекулы. Атомарный водород – это одноатомный газ, атомы которого в данной модели участвуют только в поступательном движении $\langle E_{\text{пост}} \rangle = \frac{i_{\text{пост}}}{2} kT$. Число степеней свободы $i_{\text{пост}} = 3$, т.к. положение центра инерции атома задается тремя координатами (x, y, z). $\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT$</p> <p>Следовательно,</p> |
| <p>Если не учитывать колебательные движения в линейной молекуле углекислого газа CO_2 (см. рис.), то отношение кинетической энергии вращательного движения к полной кинетической энергии молекулы равно ...</p> <p>Ответ: $\frac{2}{5}$</p> | <p>Средняя кинетическая энергия молекулы равна $\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT$, где k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура, i – сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы: $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вр}} + 2n_{\text{колеб}}$. Для линейной молекулы углекислого газа CO_2 (см. рис.) число степеней свободы</p> |

| | |
|--|--|
| <p style="text-align: center;">$O \quad C \quad O$</p>  <p>Варианты ответа</p> <p>1. $\frac{2}{13}$ 2. $\frac{3}{6}$ 3. $\frac{2}{5}$ 4. $\frac{3}{5}$</p> | <p>поступательного движения $n_{пост} = 3$, вращательного – $n_{вр} = 2$, колебательного – $n_{кол} = 0$, поэтому $i = 3 + 2 + 0 = 5$.</p>  <p>Следовательно, средняя кинетическая энергия молекулы CO_2 равна $\langle E \rangle = \frac{5}{2} kT$. Средняя энергия вращательного движения $\langle E_{вр} \rangle = 2_{вр} \frac{1}{2} kT = \frac{2}{2} kT$ и составляет $\frac{\langle E_{вр} \rangle}{\langle E \rangle} = \left(\frac{2}{2} kT \right) / \left(\frac{5}{2} kT \right) = \frac{2}{5}$ части от полной энергии.</p> |
| <p>Из предложенных ниже идеальных газов выберите те, для которых отношение молярных теплоемкостей $\frac{C_p}{C_v}$ равно $\frac{7}{5}$ (колебаниями атомов внутри молекулы пренебречь).</p> <p>Ответ воздух и кислород.</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> гелий <input type="checkbox"/> воздух <input type="checkbox"/> кислород <input type="checkbox"/> водяной пар | <p>Из отношения $\frac{C_p}{C_v} = \frac{\left(\frac{i+1}{2}\right)R}{\frac{i}{2}R} = \frac{i+2}{i}$; $\frac{i+2}{i} = \frac{7}{5}$ найдем сумму числа поступательных и числа вращательных степеней свободы молекулы $i = 5$,</p> <p>$i = n_{пост} + n_{вращ} = 3_{пост} + 2_{вращ}$. На рисунке изображена модель молекулы газа, для которой выполняется последнее равенство. Прямыми стрелками показаны вероятные направления поступательного движения молекулы, круглыми – вращательного движения.</p>  <p>Из предложенных газов этому условию удовлетворяет воздух, т.к. в этой смеси газов большую часть составляют двухатомные газы азот и кислород, и газ кислород.</p> |

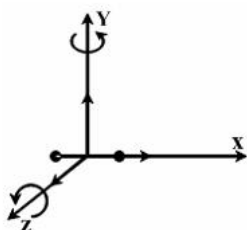
Средняя кинетическая энергия молекул газа при температуре T зависит от их конфигурации и структуры, что связано с возможностью различных видов движения атомов в молекуле и самой молекулы. При условии, что имеет место только поступательное и вращательное движение молекулы как целого, средняя кинетическая энергия молекул азота (N_2) равна

Ответ: $E=5/2kT$

Варианты ответа:

$\frac{3}{2}kT$ $\frac{7}{2}kT$

$\frac{1}{2}kT$ $\frac{5}{2}kT$



Для статистической системы в состоянии термодинамического равновесия на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная $\frac{kT}{2}$, а на каждую

колебательную степень – kT . Средняя кинетическая энергия молекулы равна

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2}kT, \text{ где } i - \text{ сумма числа}$$

поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы. При условии, что имеют место только поступательное и вращательное движение, сумма числа степеней свободы равна $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вр}}$; где $n_{\text{пост}}$ – число степеней свободы поступательного движения, равное $n_{\text{пост}} = 3$; $n_{\text{вр}}$ – число степеней свободы вращательного движения, которое может быть равно $n_{\text{вр}} = 0, 2, 3$.

Для молекулярного азота (двухатомной молекулы) $n_{\text{пост}} = 3$ и $n_{\text{вр}} = 2$.

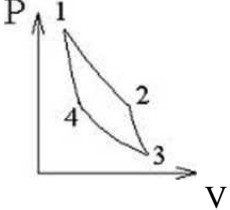
Следовательно, $i = 3 + 2 = 5$ (3 степени свободы поступательного движения по направлениям осей ординат X, Y, Z и 2 степени свободы вращательного движения вокруг осей Y и Z) (см. рис.). Тогда средняя энергия молекул азота (N_2) равна $\langle E \rangle = \frac{5}{2}kT$.

9. Второе начало термодинамики. Энтропия. Циклы.

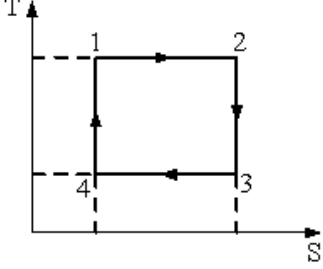
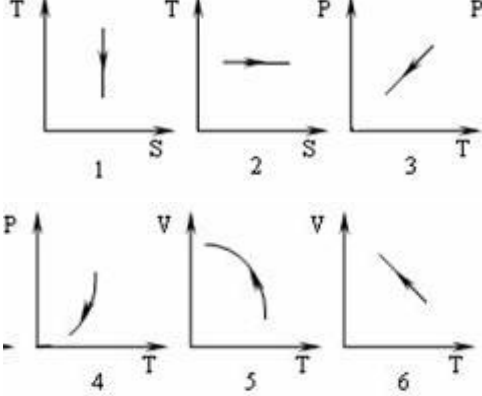
КПД цикла Карно равен 40%. Если на 20% увеличить температуру нагревателя и на 20% уменьшить температуру охладителя, КПД (в %) достигнет значения ...

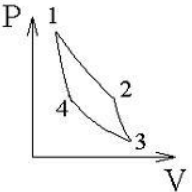
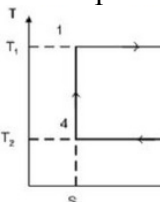
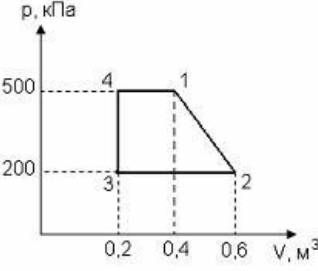
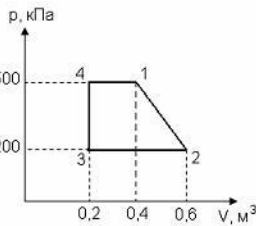
КПД обратимого цикла Карно равен: $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\%$ или $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ (в долях). После изменения температуры $T_1^* = 1,2T_1$, $T_2^* = 0,8T_2$.

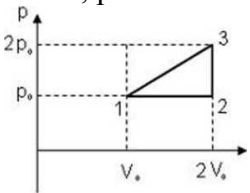
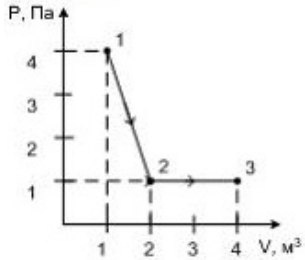
Первоначальный КПД равен $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$, $0,4 = 1 - \frac{T_2}{T_1}$, следовательно, $\frac{T_2}{T_1} = 0,6$. После изменения $\eta^* = \frac{T_1^* - T_2^*}{T_1^*} = 1 - \frac{T_2^*}{T_1^*} = 1 - \frac{0,8T_2}{1,2T_1} = 1 - \frac{0,8}{1,2} \cdot 0,6 = 0,6 = 60\%$.

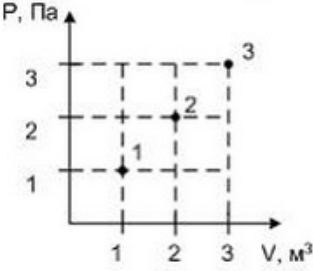
| | |
|--|---|
| <p>Тепловой двигатель, работающий по циклу Карно (см. рисунок), совершает за цикл работу, равную...</p> <p>Ответ: $A_{12} + A_{34}$</p>  <p>Варианты ответа:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) $A_{12} + A_{34}$ 2) $A_{34} + A_{41}$ 3) $A_{23} + A_{41}$ 4) $A_{12} + A_{23}$ | <p>Цикл Карно состоит из изотермического расширения газа 1-2, адиабатического расширения 2-3, изотермического сжатия 3-4 и адиабатического сжатия 4-1. Работа газа за цикл: $A_{\text{цикл.}} = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}$, причем при расширении газ совершает положительную работу, а при сжатии – отрицательную. В адиабатическом процессе работа совершается только за счет изменения внутренней энергии газа. Поскольку температуры газа $T_1 = T_2$ и $T_3 = T_4$, изменение внутренней энергии $\Delta U_{23} = -\Delta U_{41}$ (в процессе 2-3 газ охлаждается, а в 4-1 – нагревается на одну и ту же температуру). Следовательно, $A_{23} = -A_{41}$, а работа за цикл $A_{\text{цикл.}} = A_{12} + A_{34}$, причем $A_{34} < 0$</p> |
| <p>Если КПД цикла Карно равен 60%, то температура нагревателя больше температуры холодильника в _____ раз(а).</p> <p><input checked="" type="radio"/> 2,5 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 1,7</p> | <p>КПД обратимого цикла Карно равен:</p> $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$ <p>или $\frac{\eta}{100\%} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$;</p> $0,6 = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ <p>следовательно,</p> $\frac{T_2}{T_1} = 0,4 \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{5}{2} = 2,5.$ <p>отсюда и</p> |
| <p>Если количество теплоты, отдаваемое рабочим телом холодильнику, увеличится в два раза, то коэффициент полезного действия тепловой машины ...</p> <p>Ответ: уменьшится на $\frac{Q_2}{Q_1}$.</p> <p><input type="radio"/> уменьшится на $\frac{Q_2}{2Q_1}$ <input type="radio"/> увеличится на $\frac{Q_2}{Q_1}$ <input type="radio"/> уменьшится на $\frac{Q_2}{Q_1}$ <input type="radio"/> увеличится на $\frac{Q_2}{2Q_1}$</p> | <p>Коэффициент полезного действия тепловой машины определяется по формуле $\eta_1 = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$, где Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя; Q_2 – количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику. При увеличении в два раза Q_2 коэффициент полезного действия: $\eta_2 = \frac{Q_1 - 2Q_2}{Q_1} = 1 - 2\frac{Q_2}{Q_1}$. Найдем изменение $\eta_2 - \eta_1 = 1 - 2\frac{Q_2}{Q_1} - 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = -\frac{Q_2}{Q_1}$. Коэффициент полезного действия тепловой машины уменьшится на $\frac{Q_2}{Q_1}$.</p> |
| <p>В идеальной тепловой машине, работающей по циклу Карно, абсолютная температура нагревателя в 2 раза превышает температуру холодильника. Если температура холодильника уменьшится вдвое при неизменной</p> | <p>КПД обратимого цикла Карно равен $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$, где T_1 температура нагревателя, T_2 температура холодильника.</p> |

| | |
|--|--|
| <p>температуре нагревателя, то КПД машины станет равным...</p> <p>Ответ: 75%</p> | <p>По условию для начального состояния $T_1=2T_2$, а</p> $T_1^* = T_1, T_2^* = \frac{T_2}{2}$ <p>для конечного состояния</p> $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{2T_2} = \frac{1}{2}$ <p>Тогда $\eta = \frac{1}{2} \cdot 100\% = 50\%$</p> <p>После понижения температуры холодильника КПД будет равен</p> $\eta^* = 1 - \frac{T_2^*}{T_1^*} = 1 - \frac{T_2}{2T_1} = 1 - \frac{T_2}{2 \cdot 2T_2} = \frac{3}{4}, \text{ или } 75\%.$ |
| <p>В процессе кристаллизации вещества энтропия неизолированной термодинамической системы ...</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> убывает</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> остается постоянной</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> увеличивается</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> может как увеличиваться, так и оставаться</p> | <p>Отношение $\frac{\delta Q}{T}$ в обратимом процессе есть полный дифференциал функции состояния системы, называемой энтропией S</p> $dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{обр}}$ <p>системы: Образование кристаллической решетки при кристаллизации вещества приводит к уменьшению энтропии:</p> $dS < \frac{\delta Q}{T}$ |
| <p>Идеальному трехатомному газу (с нелинейными молекулами) в изобарном процессе подведено количество теплоты Q. При этом на работу расширения расходуется _____% подводимого количества теплоты. (Считать связь атомов в молекуле жесткой.)</p> | <p>Согласно первому началу термодинамики, $Q = \Delta U + A_{\text{газа}}$, где Q – количество теплоты, полученное газом, ΔU – приращение его внутренней энергии, $A_{\text{газа}}$ – работа, совершенная газом. Изменение внутренней энергии</p> $\Delta U = \frac{m}{M} C_V \Delta T = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$ <p>Работа газа при изобарном процессе</p> $A = p \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T$ <p>Тогда</p> $Q = \Delta U + A = \frac{i+2}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i+2}{2} A$ <p>Доля количества теплоты, расходуемого на работу расширения, составит $\frac{A}{Q} = \frac{2}{i+2}$. Для трехатомного газа с жесткой связью атомов в молекуле</p> $i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вр}} = 3 + 3 = 6$ <p>Следовательно,</p> |

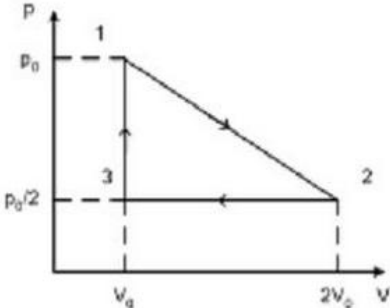
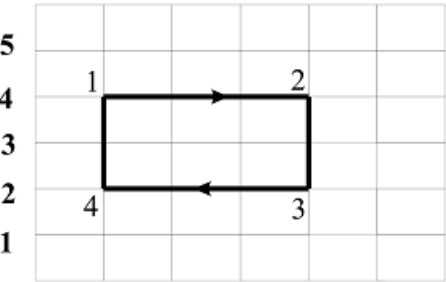
| | |
|---|---|
| | $\frac{A}{Q} = \frac{2}{i+2} = \frac{2}{8} = 0,25 = 25\%$ |
| <p>На рисунке изображен цикл Карно в координатах (T, S), где S – энтропия. Адиабатное расширение происходит на этапе ... Ответ: 2-3</p>  | <p>Адиабатные процессы происходят без теплообмена с окружающей средой, т.е. система не получает тепла и не отдает его, $\delta Q = 0$. Так как изменение энтропии определяется как $dS = \frac{\delta Q}{T}$, следовательно, при адиабатном процессе энтропия остается постоянной. При адиабатном расширении газ совершает работу за счет уменьшения внутренней энергии: $\delta A = -dU$, температура газа уменьшается. Адиабатное расширение происходит на этапе 2 – 3.</p> |
| <p>Варианты ответа: 3 – 4, 1 – 2, 2 – 3, 4 – 1</p> | |
| <p>Адиабатному расширению газа (P – давление, V – объем, T – температура, S – энтропия) соответствует диаграмма ...</p>  | <p>Для адиабатного процесса $\delta Q = 0$, тогда изменение энтропии системы $\Delta S = 0$ и $S = const$, т.к. $\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}$. Верным будет график 1. На графике 2 энтропия возрастает. Сравнивая графики 4 и 3, исключаем последний, т.к. он соответствует изохорному процессу. Для адиабатного процесса: $\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{p_1}{p_2}$, где коэффициент Пуассона $\gamma = \frac{C_p}{C_v} > 1$. Обозначив $\frac{\gamma}{\gamma-1} = n, n > 1$, получим $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^n$. Следовательно, $P \sim T^n$, график степенной функции изображен на рисунке 4. Для графиков 5 и 6 можно применить формулу $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$. Обозначив $\frac{\gamma}{\gamma-1} = n, n > 1$, получим $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^n$, т.е. $V \sim T^n$. График обратной степенной функции похож на график гиперболы. Следовательно, график 5 не отвечает адиабатному процессу, так же как и график 6.</p> |
| <p>Ответ: 1, 4</p> <p><input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 6</p> <p><input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2</p> <p><input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4</p> | |
| <p>Чтобы расплавить некоторую массу меди, требуется большее количество теплоты, чем для плавления такой же массы цинка, так как удельная теплота плавления меди в 1,5 раза больше, чем цинка ($\lambda_{Cu} = 1,8 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\lambda_{Zn} = 1,2 \cdot 10^5$ Дж/кг). Температура плавления меди примерно в 2 раза выше температуры плавления цинка ($T_{Cu} = 1356K$, $T_{Zn} = 693K$). Разрушение кристаллической решетки металла при плавлении приводит к возрастанию</p> | <p>В термодинамике изменение энтропии определяется формулой $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$, где ΔQ – количество теплоты, полученное системой при температуре T. Пусть изменение энтропии при плавлении цинка $\Delta S_{Zn} = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{m\lambda_{Zn}}{T_{Zn}} = \Delta S$, тогда энтропия меди при ее плавлении возрастет на $\Delta S_{Cu} = \frac{m\lambda_{Cu}}{T_{Cu}}$. Найдем отношение</p> |

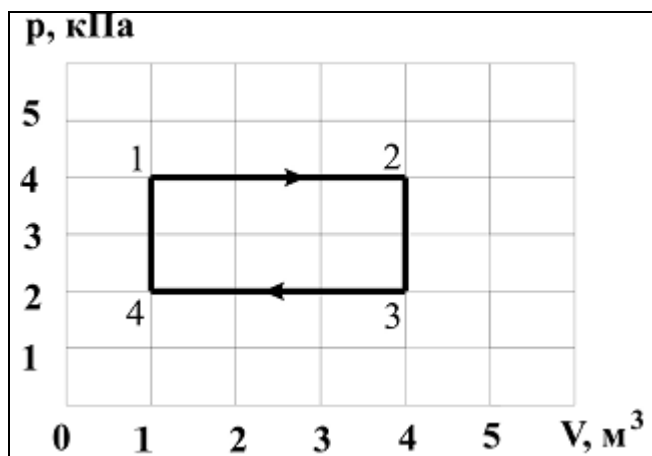
| | |
|--|--|
| <p>энтропии. Если энтропия цинка увеличилась на ΔS, то изменение энтропии меди составит ...</p> <p>Ответ: $\Delta S_{Cu} = \Delta S_{Zn} \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{4} \Delta S$</p> | $\frac{\Delta S_{Cu}}{\Delta S_{Zn}} = \frac{\lambda_{Cu} T_{Zn}}{\lambda_{Zn} T_{Cu}} \approx \frac{1,5}{2} = \frac{3}{4}$ <p>Следовательно, $\Delta S_{Cu} = \Delta S_{Zn} \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{4} \Delta S$</p> |
| <p>Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно (две изотермы 1-2, 3-4 и две адиабаты 2-3, 4-1). В процессе изотермического расширения 1-2 энтропия рабочего тела ...</p> <p>Ответ: возрастает</p>  <p>Варианты ответа</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. сначала возрастает, затем уменьшается 2. уменьшается 3. не изменяется 4. возрастает | <p>При изотермическом расширении 1-2 ν молей газа (рабочее тело) находится в контакте с нагревателем температуры T и получают от него тепло dQ. Согласно 1 началу термодинамики $dQ = dU + dA$. С учетом изменения внутренней энергии при изотермическом процессе $dU = 0$ (dA - работа газа) и уравнения состояния идеального газа $pV = \nu RT$, изменение энтропии в процессе 1-2 равно:</p> $\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{dU + dA}{T} = \int_1^2 \frac{dA}{T} = \int_1^2 \frac{pdV}{T} = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}$ <p>Так как объем $V_2 > V_1$, то $\Delta S > 0$, т.е. энтропия возрастает. Если цикл Карно изобразить в координатах (T, S), то очевидно, что в процессе 1-2 энтропия возрастает.</p>  |
| <p>При плавлении вещества энтропия неизолированной термодинамической системы ...</p> <p><input checked="" type="radio"/> увеличивается</p> <p><input type="radio"/> остается постоянной</p> <p><input type="radio"/> убывает</p> <p><input type="radio"/> может как убывать, так и оставаться постоянной</p> | |
| <p>Диаграмма циклического процесса идеального одноатомного газа представлена на рисунке. Работа газа в килоджоулях в циклическом процессе равна ... Ответ: 90 кДж</p>  |  <p>Работу газа в циклическом процессе можно найти, определив площадь цикла в координатах p, V. Цикл имеет форму трапеции.</p> $S_{1-2-3-4-1} = \frac{0,2 + 0,4}{2} \cdot 300 = 90 \text{ кДж}$ |
| <p>10. Первое начало термодинамики. Работа при изопроцессах.</p> | |
| <p>Одноатомному идеальному газу в результате изобарического процесса подведено количество теплоты ΔQ. На увеличение внутренней энергии газа</p> | <p>Используя первое начало термодинамики для изобарического процесса, можно определить $\Delta Q = \Delta U + A_{1-2}$, где ΔQ - количество теплоты, сообщенное</p> |

| | |
|--|--|
| <p>расходуется часть теплоты $\frac{\Delta U}{\Delta Q}$, равная (в процентах) ...</p> <p>Ответ 60%</p> | <p>газу, ΔU – увеличение внутренней энергии газа, A_{1-2} – работа, совершенная газом. Для изобарного процесса $\Delta Q = \nu C_p \Delta T$, $\Delta U = \nu C_V \Delta T$, где ν – число молей газа, ΔT – изменение температуры газа, C_p, C_V – молярные теплоемкости при постоянном давлении, при постоянном объеме. $\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{C_V}{C_p} = \frac{i}{i+2}$, где i – сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы. Для одноатомного газа $i = 3$ (3 поступательные степени свободы),</p> $\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{3}{5} = 0,6 = 60\%$ <p>следовательно, $\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{3}{5} = 0,6 = 60\%$.</p> |
| <p>Идеальный газ переводят из состояния 1 в состояние 3 двумя способами: по пути 1-3 и 1-2-3. Отношение работ $\frac{A_{1-3}}{A_{1-2-3}}$ совершенных газом, равно ... Ответ: 1.5</p>  <p>Варианты ответа: 1. 1,5 2. 4 3. 3 4. 2</p> | <p>Работу газа можно найти как площадь под графиком процесса. В процессе 1-3 работа газа равна:</p> <p>С учетом того, что в изохорном процессе 2-3 газ работу не совершает $A_{2-3} = 0$, имеем:</p> <p>Отношение работ равно:</p> $\frac{A_{1-3}}{A_{1-2-3}} = \frac{\frac{3}{2} p_0 V_0}{p_0 V_0} = \frac{3}{2} = 1,5$ |
| <p>Внутренняя энергия молекулярного азота (газ считать идеальным) в результате процесса 1-2-3, изображенного на рисунке, изменяется на ___ Дж. Ответ: $\Delta U_{1-3} = 0$</p>  <p>Варианты ответа: 1. 0 2. 4 3. 9/2 4. 6</p> | <p>Изменение внутренней энергии как функции состояния не зависит от вида процесса, а определяется значением параметров газа в начальном и конечном состоянии. Следовательно,</p> $\Delta U_{1-2-3} = \Delta U_{1-3} = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_3 - T_1)$ <p>Из диаграммы процесса видно, что $p_1 V_1 = p_3 V_3$ значит, $T_3 = T_1$ (точки 1 и 3 лежат на одной изотерме). Изменение внутренней энергии равно $\Delta U_{1-3} = 0$.</p> |
| <p>Один моль идеального одноатомного газа в ходе некоторого процесса получил 2507 Дж теплоты. При этом его температура понизилась на 200 К. Работа (в Дж), совершенная газом,</p> $\left(R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right)$ <p>равна ...</p> | <p>Согласно первому началу термодинамики, $Q = \Delta U + A_{газа}$, где Q – количество теплоты, полученное газом, ΔU – приращение его внутренней энергии, $A_{газа}$ – работа, совершенная газом.</p> <p>Отсюда $A_{газа} = Q - \Delta U$. Приращение внутренней энергии в данном случае $\Delta U < 0$,</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>так как температура газа в ходе процесса понизилась.</p> $\Delta U = \frac{m}{M} C_V \Delta T = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 8,31 \cdot (-200) =$ <p>Тогда работа, совершенная газом, равна $A_{газа} = 2507 - (-2493) = 5000 \text{ Дж}$.</p> |
| <p>Изменение внутренней энергии газа при изохорном процессе возможно ...</p> <p>Ответ: лишь при передаче газу теплоты извне (либо при передаче газом теплоты внешним телам).</p> | <p>Согласно первому началу термодинамики изменение внутренней энергии системы определяется формулой $\Delta U = Q + A'$, где Q - количество теплоты, переданное системе внешней средой и не связанное с изменением объема; A' - работа совершенная внешними телами над системой и связанная с изменением объема.</p> <p>Так как при изохорном процессе объем $V = \text{const}$, то работа $A' = 0$. Тогда первое начало термодинамики приобретает вид: $\Delta U = Q$ т.е. изменение внутренней энергии возможно лишь при передаче газу теплоты извне (либо при передаче газом теплоты внешним телам).</p> |
| <p>При увеличении давления в 3 раза и уменьшении объема в 2 раза внутренняя энергия идеального газа ...</p> <p>Варианты ответа:</p> <ol style="list-style-type: none"> уменьшится в 1,5 раза увеличится в 6 раз уменьшится в 6 раз увеличится в 1,5 раза | <p>Внутренняя энергия идеального газа равна $U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV$ (учитываем, что $pV = \frac{m}{M} RT$), где p - давление, V - объем, i - полное число степеней свободы, R - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура, m - масса газа, M - молярная масса газа.</p> $\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{i}{2} p_1 V_1 \\ U_2 &= \frac{i}{2} p_2 V_2 \end{aligned} \right\}$ <p>Учитывая, что, $p_2 = 3p_1$, $V_2 = \frac{V_1}{2}$</p> $\frac{U_2}{U_1} = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = \frac{3p_1 V_1}{2p_1 V_1} = \frac{3}{2} = 1,5$ <p>получаем $U_2 = 1,5U_1$</p> <p>Следовательно, $U_2 = 1,5U_1$</p> |
| <p>Идеальный газ имеет минимальную внутреннюю энергию в состоянии ...</p> <p>Ответ: в состоянии 1.</p>  | <p>Внутренняя энергия идеального газа равна $U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV$ (учитываем, что $pV = \frac{m}{M} RT$), где p - давление, V - объем, i - полное число степеней свободы, R - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура, m - масса газа, M - молярная масса газа.</p> <p>В нашем случае минимальное значение произведения $pV = 1 \text{ Па} \cdot 1 \text{ м}^3$ соответствует</p> |

| | |
|--|---|
| | <p>состоянию газа, обозначенному на $p-V$ диаграмме точкой 1. Следовательно, идеальный газ имеет минимальную внутреннюю энергию в состоянии 1.</p> |
| <p>На диаграмме (p, V) изображен цикл Карно для идеального газа.</p>  <p>Для величины работы адиабатического расширения газа A_{2-3} и адиабатического сжатия A_{4-1} справедливо соотношение ...</p> <p>Ответ: $A_{2-3} = A_{4-1}$</p> <p>Варианты ответа:</p> <ol style="list-style-type: none"> $A_{2-3} < A_{4-1}$ работы невозможно сравнить $A_{2-3} > A_{4-1}$ $A_{2-3} = A_{4-1}$ | <p>Цикл Карно состоит из двух изотерм (изотермического расширения $1-2$ при температуре T_1 и изотермического сжатия $3-4$ при температуре $T_2 < T_1$) и двух адиабат (адиабатического расширения $2-3$ и адиабатического сжатия $4-1$). При адиабатическом расширении $2-3$ и адиабатическом сжатии $4-1$ теплообмен с окружающей средой отсутствует, и поэтому работы расширения A_{2-3} и сжатия A_{4-1} совершаются за счет изменения внутренней энергии $A_{2-3} = -\Delta U_{2-3}$ и $A_{4-1} = -\Delta U_{4-1}$. Следовательно, работы газа в адиабатических процессах $2-3$ и $4-1$ равны по величине: $A_{2-3} = A_{4-1}$, а на (p, V)-диаграмме графически определяются площадями S_{II} и S_I заштрихованных фигур под графиками соответствующих процессов, и эти площади равны $S_{II} = S_I$.</p> |
| <p>На $p-V$ - диаграмме изображены два циклических процесса.</p>  <p>Отношение работ A_I/A_{II}, совершенных в этих циклах, равно ...</p> <p>Ответ: $1/2$</p> | <p>Работа газа за цикл численно равна площади фигуры, ограниченной диаграммой кругового процесса в координатных осях p, V. При осуществлении кругового процесса в прямом направлении (по часовой стрелке) работа газа за цикл положительна, так как при расширении газ совершает большую работу, чем затрачивается на его сжатие. Если круговой процесс осуществляется в обратном направлении (против часовой стрелки), то работа газа за цикл отрицательна. Работы газа за I первый и II второй циклы на (p, V)-диаграмме, совершаемые против часовой стрелки, численно равны площадям прямоугольников:</p> $A_I = -(p_2 - p_1)(V_4 - V_1) = -3pV$ <p>и</p> $A_{II} = -(p_4 - p_1)(V_8 - V_6) = -6pV$ <p>Отношение работ, совершенных в этих</p> |

| | |
|--|---|
| | $\frac{A_I}{A_{II}} = \frac{-3pV}{-6pV} = \frac{1}{2}$ циклах: |
| <p>На рисунке изображен циклический процесс, происходящий с одним молем двухатомного идеального газа. Газ совершает работу только за счет полученного извне тепла на участке...</p> <p>Ответ: 1-2</p>  <p>Варианты ответа:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1-2 3-1 2-3 1-2, 2-3 | <p>Из графика видно, что газ получает теплоту в процессах 1-2 и 3-1. Переход 3-1 осуществляется при постоянном объеме, следовательно, работа газа $A_{3-1}=0$. Из графика видно, что точки 1 и 2 лежат на одной изотерме, т.к. $p_1V_1 = p_2V_2 = p_0V_0$; следовательно, $T_1 = T_2$ и изменение внутренней энергии $\Delta U_{1-2} = 0$. По 1 началу термодинамики для процесса 1-2 количество теплоты равно: $Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + A_{1-2} = A_{1-2}$, т.е. газ совершает работу только за счет полученного извне тепла. Процесс 2-3 является изобарным сжатием, газ передает тепло внешней среде.</p> |
| <p>На рисунке представлена диаграмма циклического процесса идеального одноатомного газа:</p> <p>p, кПа</p>  <p>0 1 2 3 4 5 V, м³</p> <p>За цикл газ получает количество теплоты (в кДж), равное ... Ответ: 33кДж</p> | <p>Цикл состоит из изохорного нагревания (4–1), изобарного расширения (1–2), изохорного охлаждения (2–3) и изобарного сжатия (3–4). На первых двух этапах цикла газ получает теплоту. Согласно первому началу термодинамики, количество теплоты, получаемое газом, равно $Q = \Delta U + A$, где ΔU – изменение внутренней энергии, A – работа газа. Тогда</p> $Q_{41} = \Delta U_{41} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T_{41} = \frac{3}{2} V \Delta p = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^3 = 3 \cdot 10^3$ $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T_{12} + p \Delta V_{12} = \frac{5}{2} p \Delta V_{12} = \frac{5}{2} \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^3 = 15 \cdot 10^3$ <p>Таким образом, количество теплоты, получаемое газом за цикл, равно</p> $Q = Q_{41} + Q_{12} = 33 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 33 \text{ кДж.}$ |
| <p>Диаграмма циклического процесса идеального одноатомного газа представлена на рисунке. Отношение работы газа за цикл к работе при охлаждении газа по модулю равно ...</p> | <p>Работа газа за цикл в координатных осях p, V численно равна площади фигуры, ограниченной диаграммой кругового процесса.</p> $A_{1-2-3-4-1} = (4p - 2p)(4V - V) = 6pV.$ <p>Работа при охлаждении численно равна площади под графиком процесса 3 – 4:</p> $A_{3-4} = 2p(V - 4V) = -6pV.$ <p>Отношение</p> |



работ, совершенных в этих процессах,

$$\frac{A_{1-2-3-4-1}}{A_{3-4}} = \frac{6pV}{-6pV} = -1.$$

равно:

Модуль

отношения: $\left| \frac{A_{1-2-3-4-1}}{A_{3-4}} \right| = 1$.