С. В. ВОЗНЮК, С. А. МИНАБУДИНОВА, Н. А. ХМЫРОВА

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА
(ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ)

ОМСК 2018

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

С. В. Вознюк, С. А. Минабудинова, Н. А. Хмырова

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА
(ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ)

Утверждено методическим советом университета
в качестве учебно-методического пособия
для студентов первого курса очной формы обучения

Омск 2018

УДК 539.1(075.8)

ББК 22.36я73
В64

Молекулярная физика и термодинамика (примеры решения задач): Учебно-методическое пособие / С. В. Вознюк, С. А. Минабудинова, Н. А. Хмырова; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. 33 с.

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с действующей программой по курсу общей физики для вузов, содержит методические рекомендации по изучению физики, примеры решения задач по теме «Молекулярная физика и термодинамика».

Предназначено для студентов первого курса очной формы обучения.

Библиогр.: 4 назв. Рис. 4. Прил. 1.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. Р. Ведрученко;
канд. филос. наук, доцент Т. В. Добровольская.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Изучение общего курса физики формирует у студентов основные представления о важнейших физических закономерностях, лежащих в основе работы механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических приборов и устройств, эксплуатируемых на железнодорожном транспорте.

Успешное изучение физики в вузе невозможно без умения применять физические закономерности на практике, однако именно решение задач вызывает наибольшие затруднения у студентов. Это связано с тем, что решение конкретных задач требует не только знания физических законов, но и определенного методического подхода.

Цель настоящего издания – оказать помощь студентам в самостоятельном усвоении основных физических величин и законов, а также методики решения типовых задач по разделу «Молекулярная физика и термодинамика».

Как научиться решать задачи?

Перед решением задач нужно изучить теоретический материал по соответствующей теме, затем внимательно прочитать условие задачи и понять, какое явление она описывает и какой процесс изучает. После этого следует переписать в тетрадь условие задачи полностью и кратко (столбиком), правильно обозначить используемые величины и рационально расставить индексы (это рекомендуется сделать после того, как выполнен рисунок). Значения величин, приведенные в задаче, следует перевести в «основные» единицы СИ (например, граммы – в килограммы, литры – в кубические метры и т. д.). Обычно задача решается в общем виде. Численные значения величин рекомендуется подставлять в расчетную формулу после того, как получено алгебраическое выражение для определения искомой величины.

При решении задачи необходимо оценивать, где это целесообразно, правдоподобность численного ответа. В ряде случаев такая оценка поможет обнаружить ошибку в полученном результате. Например, коэффициент полезного действия тепловой машины не может быть больше 100 %, абсолютная температура не может быть отрицательной и т. д.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Уравнение состояния идеального газа

Идеальный газ – это модель, позволяющая понять свойства очень многих природных систем и закономерности значительной части природных явлений. Модель идеального газа – это система частиц, взаимодействующих друг с другом и со стенками сосуда только в кратковременных соударениях. Эта модель хорошо описывает свойства реальных газов и их смесей, например воздуха, причем не только при атмосферном давлении, но и при значениях давления гораздо выше и ниже атмосферного.

П р и м е р 1. В стеклянный сосуд закачивают воздух, одновременно нагревая его. При этом абсолютная температура воздуха в сосуде повысилась в три раза, а его давление выросло в пять раз. Во сколько раз увеличилась масса воздуха в сосуде?

Дано:

$\frac{T_2}{T_1} = 3$

$\frac{P_2}{P_1} = 5$

$\frac{m_2}{m_1} - ?$

Решение.

Составим систему из уравнений состояния, считая воздух идеальным газом:

$$P_1 V = \frac{m_1}{M} R T_1; \qquad (1.1)$$

$$P_2 V = \frac{m_2}{M} R T_2. \qquad (1.2)$$

Выразим m_1 и m_2 из уравнений (1.1) и (1.2) соответственно и найдем их отношение:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = \frac{5}{3} = 1{,}67.$$

Ответ: масса воздуха увеличилась в 1,67 раза.

П р и м е р 2. Какова плотность аммиака NH_3 при давлении 1,6 атм и температуре $10\,^{\circ}C$?

Дано:	СИ	*Решение.*
$M = 17$ г/моль$^{-1}$		Плотность газа определяется по формуле:
$P = 1{,}6$ атм	$P = 1{,}6 \cdot 10^5$ Па	$$\rho = \frac{m}{V}, \qquad (1.3)$$
$t = 10\,°C$	$T = 283$ К	где m – масса газа.
ρ – ?		

Выразим из формулы (1.3) массу газа и подставим в уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона):

$$PV = \frac{m}{M} RT. \qquad (1.4)$$

Получим:

$$P = \frac{\rho}{M} RT, \qquad (1.5)$$

откуда выразим искомую плотность газа:

$$\rho = \frac{PM}{RT}. \qquad (1.6)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\rho] = \frac{\text{Па} \cdot \dfrac{\text{кг}}{\text{моль}}}{\dfrac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К}} = \frac{\dfrac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{кг}}{\text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} .$$

Производим вычисления:

$$\rho = \frac{1{,}6 \cdot 10^5 \cdot 17 \cdot 10^{-3}}{8{,}31 \cdot 283} = 1{,}16 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Ответ: $\rho = 1{,}16$ кг/м^3.

П р и м е р 3. В баллоне объемом 64 л находится воздух под давлением 760 мм рт. ст. при температуре 17°С. Сколько воздуха по массе выйдет из баллона, если температуру в нем повысить до 20°С, а давление увеличить на 15 %?

Дано:	СИ	*Решение.*
$V = 6{,}4$ л	$V = 6{,}4 \cdot 10^{-3}$ м^3	Записываем уравнение Менделеева – Клапейрона для двух состояний воздуха, который считается идеальным газом:
$P_1 = 760$ мм рт. ст.	$P_1 = 10^5$ Па	
$t_1 = 17\,°$C	$T_1 = 290$ К	
$t_2 = 20\,°$C	$T_2 = 293$ К	
$M = 29$ г/моль	$M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	
$\alpha = 15$ %	$\alpha = 0{,}15$	
Δm – ?		

$$P_1 V = \frac{m_1}{M} R T_1; \qquad (1.7)$$

$$P_2 V = \frac{m_2}{M} R T_2, \qquad (1.8)$$

где

$$P_2 = (1+\alpha) P_1. \qquad (1.9)$$

Из уравнений (1.7) – (1.9) имеем:

$$m_1 = \frac{P_1 V M}{R T_1}; \qquad (1.10)$$

$$m_2 = \frac{P_2 V M}{R T_2} = \frac{(1+\alpha) P_1 V M}{R T_2}. \qquad (1.11)$$

Следовательно,

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{(1+\alpha) P_1 V M}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \qquad (1.12)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\Delta m] = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \dfrac{\text{кг}}{\text{моль}}}{\dfrac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} \left(\frac{1}{\text{К}} - \frac{1}{\text{К}} \right) = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \frac{\dfrac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг}}{\text{Н} \cdot \text{м}} = \text{кг}.$$

Производим вычисления:

$$\Delta m = \frac{1{,}15 \cdot 10^5 \cdot 6{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{8{,}31} \left(\frac{1}{290} - \frac{1}{293} \right) = 9{,}1 \cdot 10^{-5} (\text{кг}) = 0{,}091 \text{ (г)}.$$

Ответ: $\Delta m = 0{,}091$ г.

2. Закон Дальтона

В том случае, когда идеальный газ состоит из частиц нескольких сортов, давление идеального газа есть сумма давлений, которые оказывали бы частицы каждого сорта, если бы всех остальных не было (парциальные давления). Это утверждение называется законом Дальтона.

П р и м е р 4. Баллон содержит 80 г кислорода и 320 г аргона. Давление смеси составляет 10 атм, температура равна 27 °С. Принимая данные газы за идеальные, определить объем баллона.

Дано:	СИ
$m_1 = 80$ г	$m_1 = 8 \cdot 10^{-2}$ кг
$M_1 = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	
$m_2 = 320$ г	$m_2 = 0{,}32$ кг
$M_2 = 40 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	
$P = 10$ атм	$P = 10^6$ Па
$t = 27\,°\mathrm{C}$	$T = 300$ К
V – ?	

Решение.

По закону Дальтона давление смеси газов равно сумме парциальных давлений, входящих в состав смеси:

$$P = P_1 + P_2 . \qquad (2.1)$$

Парциальные давления кислорода P_1 и аргона P_2 можно выразить из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$P_1 = \frac{m_1 RT}{M_1 V}; \qquad (2.2)$$

$$P_2 = \frac{m_2 RT}{M_2 V}. \qquad (2.3)$$

Тогда по закону Дальтона давление смеси газов

$$P = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \frac{RT}{V}, \qquad (2.4)$$

откуда объем смеси газов (объем баллона)

$$V = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \frac{R\,T}{P}. \qquad (2.5)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[V] = \left(\frac{\text{кг}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}}} + \frac{\text{кг}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \right) \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К}}{\text{Па}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Па}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} = \text{м}^3.$$

Производим вычисления:

$$V = \left(\frac{0{,}08}{32 \cdot 10^{-3}} + \frac{0{,}32}{40 \cdot 10^{-3}} \right) \frac{8{,}31 \cdot 300}{10^6} = 0{,}0262\ (\text{м}^3) = 26{,}2\ (\text{л}).$$

Ответ: $V = 26{,}2$ л.

П р и м е р 5. Два баллона объемом 7,5 и 12 л, снабженные кранами, соединены трубкой объемом 1,2 л, из которой откачан воздух. В первом баллоне находится аргон под давлением 56,7 атм при температуре 25 °С, а во втором – неон, концентрация молекул которого равна $1{,}4 \cdot 10^{21}$ см$^{-3}$. Какое давление установится в баллонах, если открыть оба крана, а температура при этом понизится до 12 °С?

Дано:	СИ
$V_1 = 7{,}5$ л	$V_1 = 7{,}5 \cdot 10^{-3}$ м^3
$V_2 = 12$ л	$V_2 = 12 \cdot 10^{-3}$ м^3
$V_Т = 1{,}2$ л	$V_Т = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ м^3
$P_1 = 56{,}7$ атм	$P_1 = 56{,}7 \cdot 10^5$ Па
$t_1 = 25$ °С	$T_1 = 298$ К
$n_2 = 1{,}4 \cdot 10^{21}$ см$^{-3}$	$n_2 = 1{,}4 \cdot 10^{27}$ м$^{-3}$
$t^{\circ}_К = 12$ °С	$T_К = 285$ К
P – ?	

Решение.

После открытия кранов в результате диффузии газы перемешаются, и в системе объемом $V = V_1 + V_2 + V_T$ будет находиться смесь двух газов – аргона и неона, давление которой определяется по закону Дальтона о парциальных давлениях для смеси газов:

$$P = P_{Ar} + P_{Ne}. \quad (2.6)$$

Для того чтобы найти парциальное давление аргона P_{Ar} в смеси газов, запишем уравнение Менделеева – Клапейрона для конечного и начального состояний этого газа:

$$P_{Ar} V = \frac{m_{Ar}}{M_{Ar}} R T_К; \quad (2.7)$$

$$P_1V_1 = \frac{m_{Ar}}{M_{Ar}} RT_1. \qquad (2.8)$$

Разделим уравнение (2.7) на формулу (2.8) и из полученного равенства выразим парциальное давление аргона:

$$P_{Ar} = \frac{P_1V_1}{V}\frac{T_{\text{К}}}{T_1}. \qquad (2.9)$$

Концентрация молекул неона во втором баллоне известна из условия задачи, что позволяет найти число молекул этого газа, которое, очевидно, не изменится при открывании кранов:

$$N_{Ne} = n_2V_2. \qquad (2.10)$$

Тогда для неона после открытия кранов можно записать уравнение состояния и преобразовать его с учетом формулы (2.10):

$$P_{Ne} = n_{Ne}k_{Б}T_{\text{К}} = \frac{N_{Ne}}{V}k_{Б}T_{\text{К}} = \frac{n_2V_2}{V}k_{Б}T_{\text{К}}. \qquad (2.11)$$

Подставляя значения парциального давления аргона (2.9) и неона (2.11) в закон Дальтона (2.6) и расписывая суммарный объем, получим расчетную формулу:

$$P = \left(\frac{P_1V_1}{T_1} + n_2V_2k_{Б}\right)\frac{T_{\text{К}}}{V_1 + V_2 + V_T}. \qquad (2.12)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[P] = \left(\frac{\text{Па}\cdot\text{м}^3}{\text{К}} + \text{м}^{-3}\cdot\text{м}^3\,\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right)\cdot\frac{\text{К}}{\text{м}^3} = \text{Па} + \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{м}^3} = \text{Па}.$$

Производим вычисления:

$$P = \left(\frac{56{,}7\cdot10^5\cdot7{,}5\cdot10^{-3}}{298} + 1{,}4\cdot10^{27}\cdot12\cdot10^{-3}\cdot1{,}38\cdot10^{-23}\right)\times$$

$$\times\frac{285}{(7{,}5+12+1{,}2)\cdot10^{-3}} = 5{,}2\,(\text{МПа}).$$

Ответ: P = 5,2 МПа.

3. Распределения Максвелла и Больцмана

Функция распределения по скоростям частиц идеального газа, находящегося в статистическом равновесии, задаваемая формулой

$$f(\upsilon) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \upsilon^2 \exp\left(-\frac{m_0 \upsilon^2}{2k_B T} \right), \tag{3.1}$$

называется *распределением Максвелла*.

С помощью распределения Максвелла можно найти *наиболее вероятную скорость, среднее значение скорости и среднеквадратичную скорость,* которые равны соответственно

$$\upsilon_{\text{н.в.}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}; \quad (3.2) \qquad \langle \upsilon \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}; \quad (3.3) \qquad \upsilon_{\text{ск}} = \sqrt{\langle \upsilon^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (3.4)$$

Распределение частиц идеального газа во внешнем поле, в котором потенциальная энергия молекулы зависит только от ее координат, называется *распределением Больцмана* и задается формулой:

$$n(\vec{r}) = n_0 \exp\left(-\frac{W_p(\vec{r})}{k_B T} \right), \tag{3.5}$$

где $n(\vec{r})$ – концентрация частиц идеального газа в точке с радиус-вектором $\vec{r}$;

n_0 – концентрация частиц в точках с нулевой потенциальной энергией.

Распределение концентрации частиц идеального газа и давления атмосферы на любом расстоянии от поверхности Земли в однородном поле силы тяжести определяется по так называемой *барометрической формуле*:

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{k_B T} \right); \quad (3.6) \qquad P(h) = P_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{k_B T} \right), \quad (3.7)$$

где n_0 – концентрация частиц идеального газа на высоте $h = 0$;

P_0 – давление идеального газа у поверхности Земли.

Барометрическая формула справедлива при условии постоянства температуры для всех значений высоты.

П р и м е р 6. Как изменится давление идеального газа, если в данном объеме средняя скорость молекул газа увеличится в два раза, а концентрация молекул останется прежней?

Дано:

$$\frac{\langle \upsilon_2 \rangle}{\langle \upsilon_1 \rangle} = 2$$

$$\frac{P_2}{P_1} - ?$$

Решение.

Давление идеального газа в соответствии с основным уравнением молекулярно-кинетической теории (МКТ) определяется как

$$P = n k_B T, \tag{3.8}$$

а средняя скорость молекул идеального газа – по формуле:

$$\langle \upsilon \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}\,. \tag{3.9}$$

Выразим температуру газа из формулы (3.9) и подставим в (3.8). Получим уравнения для двух состояний газа:

$$P_1 = \frac{\pi k_B n M}{8R} \langle \upsilon_1 \rangle^2; \tag{3.10}$$

$$P_2 = \frac{\pi k_B n M}{8R} \langle \upsilon_2 \rangle^2. \tag{3.11}$$

Разделим (3.11) на (3.10) и получим:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\langle \upsilon_2 \rangle^2}{\langle \upsilon_1 \rangle^2} = 2^2 = 4.$$

Ответ: давление газа возрастет в 4 раза.

П р и м е р 7. На рис. 3.1 представлены графики функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла). Для этих функций верными являются утверждения о том, что

1) распределение 1 соответствует газу, имеющему бо́льшую массу молекул;

2) распределение 3 соответствует газу, имеющему бо́льшую температуру;

3) распределение 1 соответствует газу, имеющему меньшую массу молекул;

4) распределение 3 соответствует газу, имеющему меньшую температуру.

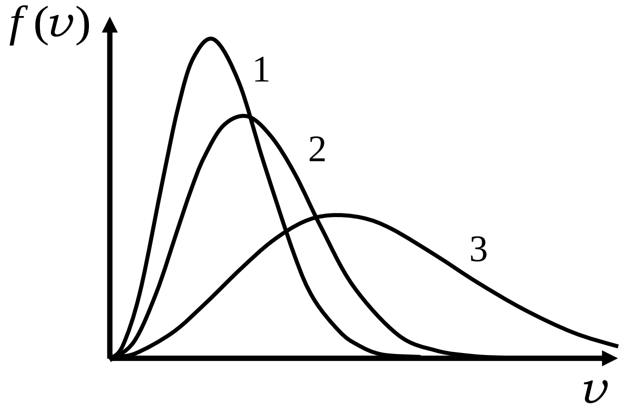

Рис. 3.1. Графики функции распределения Максвелла

Решение. Из формулы (3.2) для наиболее вероятной скорости, при которой функция распределения максимальна, следует, что при повышении температуры максимум функции сместится вправо. Следовательно, распределение 3 соответствует газу, имеющему бо́льшую температуру. Если сравнивать распределения Максвелла по скоростям различных газов при одной и той же температуре, то при увеличении массы молекулы газа максимум функции сместится влево. Значит, распределение 1 соответствует газу, имеющему бо́льшую массу молекул.

Ответ: 1) и 2).

П р и м е р 8. Зависимости давления идеального газа во внешнем однородном поле силы тяжести от высоты для двух разных значений температуры определяются барометрической формулой и представлены на рис. 3.2. Для этих функций неверными являются утверждения о том, что

1) температура T_1 выше температуры T_2;

2) температура T_1 ниже температуры T_2;

3) давление газа на высоте h равно давлению на «нулевом уровне» (h = 0), если температура газа стремится к абсолютному нулю;

4) зависимость давления идеального газа от высоты определяется не только температурой газа, но и массой молекул.

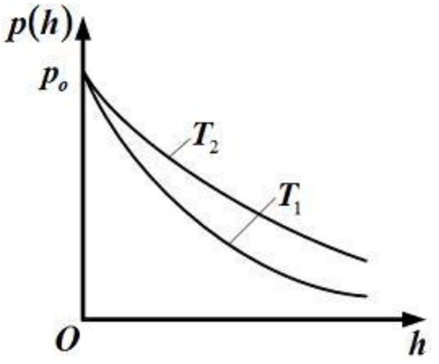

Рис. 3.2. Графики зависимости давления идеального газа от высоты

Решение. Зависимость давления идеального газа от высоты h для некоторой температуры T определяется барометрической формулой (3.7), из которой следует, что при постоянной температуре давление газа уменьшается с высотой по экспоненциальному закону тем медленнее, чем больше температура T. Давление P_0 определяется весом всего газа и не меняется при изменении температуры.

Ответ: 1) и 3).

4. Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики представляет собой закон сохранения энергии для тепловых процессов и может быть выражен формулой:

$$Q = \Delta W + A, \tag{4.1}$$

где Q – количество теплоты, переданное телу (термодинамической системе);

ΔW – приращение внутренней энергии тела;

A – работа, совершенная телом над окружающей средой.

П р и м е р 9. Одноатомный идеальный газ в количестве ν = 6 молей поглощает некоторое количество теплоты Q. При этом температура газа повышается на ΔT = 20 К. Газ в этом процессе совершает работу A = 1000 Дж. Чему равно поглощенное газом количество теплоты?

Дано:
$i = 3$
$\nu = 6$ молей
$\Delta T = 20\,\text{К}$
$A = 1000$ Дж
$Q - ?$

Решение.

Согласно первому закону термодинамики подводимая к газу теплота расходуется на совершение газом работы и изменение внутренней энергии газа:

$$Q = \Delta W + A. \tag{4.2}$$

Изменение внутренней энергии идеального газа вычисляется по формуле:

$$\Delta W = \frac{i}{2} \nu R \Delta T, \tag{4.3}$$

где i – число степеней свободы молекул идеального газа.

Производим вычисления:

$$Q = \frac{3}{2} \cdot 6 \cdot 8{,}31 \cdot 20 + 1000 = 2496\ (\text{Дж}).$$

Ответ: $Q \approx 2{,}5$ кДж.

П р и м е р 10. Кислород занимает объем 100 л и находится под давлением 200 кПа. При нагревании газ расширился при постоянном давлении до объема 300 л, затем его давление возросло до 500 кПа при неизменном объеме. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и теплоту, переданную газу. Построить график процесса на диаграмме «давление – температура».

Дано:	СИ
$V_1 = 100$ л	$V_1 = 0{,}1$ м^3
$V_2 = 300$ л	$V_2 = 0{,}3$ м^3
$V_2 = V_3$	
$P_1 = 200$ кПа	$P_1 = 2 \cdot 10^5$ Па
$P_3 = 500$ кПа	$P_3 = 5 \cdot 10^5$ Па
$P_1 = P_2$	
$i = 5$	
ΔW – ?	
A – ?	
Q – ?	

Решение.

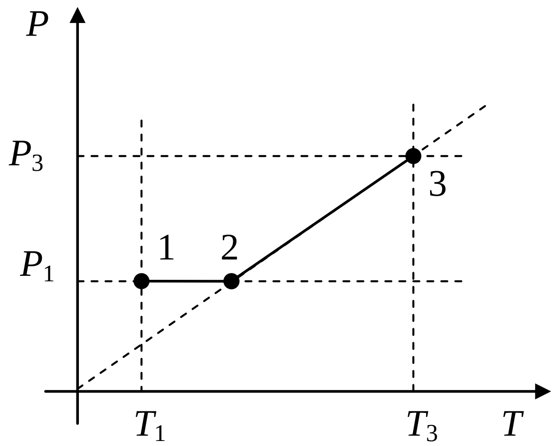

Рис. 4.1. Графики процессов

Графики процессов изобарного расширения 1 – 2 и изохорного нагревания 2 – 3 согласно условию задачи изображены на диаграмме рис. 4.1 в *PT*-координатах.

Изменение внутренней энергии идеального газа в процессе 1 – 3 вычисляется по формуле:

$$\Delta W = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\left(T_3 - T_1\right), \qquad (4.4)$$

где i – число степеней свободы молекул газа.

Используя уравнение состояния идеального газа

$$PV = \frac{m}{M}RT \qquad (4.5)$$

для состояний газа 1 и 3, запишем формулу (4.4) в виде:

$$\Delta W = \frac{i}{2}\left(P_3V_3 - P_1V_1\right). \qquad (4.6)$$

Проверяем единицу измерения:

$$\left[\Delta W\right] = \text{Па}\cdot\text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\cdot\ \text{м}^3 = \text{Н}\cdot\text{м} = \text{Дж}.$$

Работу A_{12} газа при изобарном расширении 1 – 2 вычисляем по формуле:

$$A_{12} = P_1\left(V_2 - V_1\right). \tag{4.7}$$

Так как процесс 2 – 3 изохорный (V = const), работа $A_{23} = 0$. Следовательно, полная работа, совершаемая газом,

$$A_{13} = A_{12}. \tag{4.8}$$

Проверяем единицу измерения:

$$\left[A\right] = \text{Па}\cdot\text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\cdot\ \text{м}^3 = \text{Н}\cdot\text{м} = \text{Дж}.$$

Согласно первому закону термодинамики теплота Q, переданная газу, равна сумме изменения внутренней энергии ΔW и работы A:

$$Q = \Delta W + A_{13}; \tag{4.9}$$

Производим вычисления:

$$\Delta W = \frac{5}{2}\cdot\left(5\cdot 10^5\cdot 0{,}3 - 2\cdot 10^5\cdot 0{,}1\right) = 325\ \left(\text{кДж}\right).$$

$$A_{13} = 2\cdot 10^5\cdot\left(0{,}3 - 0{,}1\right) = 40\ \left(\text{кДж}\right).$$

$$Q = 325 + 40 = 365\ (\text{кДж}).$$

Ответ: $\Delta W = 325$ кДж; $A_{13} = 40$ кДж; $Q = 365$ кДж (тепло подводится).

5. Теплоемкость

Теплоемкость тела определяется по формуле:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \tag{5.1}$$

Теплоемкость газа зависит от того, в каком процессе нагревается газ. Теплоемкость при постоянном давлении (C_P) всегда больше теплоемкости при постоянном объеме (C_V), так как количество теплоты расходуется не только на нагревание (т. е. увеличение внутренней энергии), но и на совершение работы.

П р и м е р 11. Вычислить теплоемкость при постоянном объеме двухатомного газа, заключенного в сосуд объемом 10 л при температуре 20°С и давлении 760 мм рт. ст.

Дано:	СИ
V = 10 л	$V = 10^{-2}$ м^3
P = 760 мм рт.ст.	$P = 10^5$ Па
t = 20 °С	T = 293 К
i = 5	
C_V – ?	

Решение.

Теплоемкость газа C связана с молярной теплоемкостью c_ν соотношением

$$C = c_\nu \nu, \tag{5.2}$$

где ν – количество вещества.

Тогда для теплоемкости при постоянном объеме можно записать:

$$C_V = c_{\nu V}\nu. \tag{5.3}$$

Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме

$$c_{\nu V} = \frac{i}{2}R, \tag{5.4}$$

где i – число степеней свободы молекул газа.

Подставив выражение (5.4) в (5.3), получим:

$$C_V = \frac{i}{2}\nu R. \tag{5.5}$$

Количество вещества найдем из уравнения состояния идеального газа:

$$\nu = \frac{PV}{RT}. \tag{5.6}$$

С учетом уравнения (5.6) получим расчетную формулу для теплоемкости газа при постоянном объеме:

$$C_V = \frac{i}{2} \cdot \frac{PV}{T}. \tag{5.7}$$

Проверяем единицу измерения:

$$\left[C_V\right] = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{К}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{К}} = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Производим вычисления:

$$C_V = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 293} = 8{,}5\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right).$$

Ответ: $C_V = 8{,}5\dfrac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

П р и м е р 12. При температуре 480 К некоторый газ массой 2,5 кг занимает объем 0,8 м^3. Определить давление газа, если его удельная теплоемкость при постоянном давлении 519 Дж/(кг·К) и отношение теплоемкостей равно 1,67.

Дано:

$T = 480$ К

$m = 2{,}5$ кг

$V = 0{,}8$ м^3

$c_{mP} = 519$ Дж/(кг · К)

$\gamma = 1{,}67$

$P - ?$

Решение.

Отношение теплоемкостей определяется по формуле:

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma, \tag{5.8}$$

где $\gamma = \dfrac{i+2}{i}$ – показатель адиабаты.

Выразим из формулы (5.8) число степеней свободы i:

$$i = \frac{2}{\gamma - 1}. \tag{5.9}$$

Удельная теплоемкость определяется по формуле:

$$c_{mP} = \frac{c_{vP}}{M} = \left(\frac{i}{2} + 1\right)\frac{R}{M}, \tag{5.10}$$

откуда находим *M*:

$$M = \left(\frac{i}{2} + 1\right)\frac{R}{c_{mP}} = \frac{\gamma R}{\left(\gamma - 1\right)c_{mP}}. \tag{5.11}$$

Из уравнения состояния идеального газа находим искомую величину *P*:

$$P = \frac{mRT}{MV}. \tag{5.12}$$

Подставив в формулу (5.12) выражение (5.11), получим:

$$P = \frac{mTc_{mP}(\gamma - 1)}{\gamma V}. \tag{5.13}$$

Проверяем единицу измерения:

$$\left[P\right] = \frac{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \text{Па}.$$

Производим вычисления:

$$P = \frac{2,5 \cdot 480 \cdot 519 \cdot (1,67 - 1)}{1,67 \cdot 0,8} = 3,12 \cdot 10^5\ (\text{Па}).$$

Ответ: $P = 312$ кПа.

6. Адиабатный процесс

Адиабатным называется процесс, происходящий в газе без теплообмена с окружающей средой. Адиабатный процесс описывается уравнением Пуассона:

$$PV^{\gamma} = \text{const}, \tag{6.1}$$

которое можно переписать и для других пар термодинамических координат: $TV^{\gamma - 1} = \text{const}$ и $TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const}$, а соответствующая процессу кривая называется адиабатой.

Работа газа в адиабатном процессе совершается только за счет убыли внутренней энергии и вычисляется по формуле:

$$A = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\left(T_1 - T_2\right). \qquad (6.2)$$

П р и м е р 13. Идеальный многоатомный газ, занимающий объем 240 л при давлении 164 кПа, адиабатически расширяется до десятикратного объема. Вычислить работу, совершенную газом.

Дано:	СИ
V_1 = 240 л	V_1 = 0,24 м^3
i = 6	
P_1 = 164 кПа	$P_1 = 1{,}64 \cdot 10^5$ Па
$V_2 = 10V_1$	
A – ?	

Решение.

Работа газа в адиабатном процессе вычисляется по формуле:

$$A = \frac{i}{2}\left(P_1V_1 - P_2V_2\right). \qquad (6.3)$$

Найдем давление P_2 газа в конце процесса расширения, воспользовавшись уравнением Пуассона $P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$ для двух состояний газа – в начале и в конце процесса расширения. Получим:

$$P_2 = P_1\frac{V_1^{\gamma}}{V_2^{\gamma}}. \qquad (6.4)$$

Здесь коэффициент $\gamma = \dfrac{i+2}{i}$ называется показателем адиабаты. Найдем отсюда число степеней свободы i:

$$i = \frac{2}{\gamma - 1}. \qquad (6.5)$$

Подставим выражения (6.4) и (6.5) в формулу (6.3) и получим:

$$A = \frac{i}{2}\left(P_1V_1 - P_1\frac{V_1^{\gamma}}{V_2^{\gamma}}V_2\right) = \frac{i}{2}P_1V_1\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}\right) = \frac{i}{2}P_1V_1\left(1 - \left(\frac{1}{10}\right)^{2/i}\right). \qquad (6.6)$$

Проверяем единицу измерения:

$$\left[A\right] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{ м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}.$$

Производим вычисления:

$$A = \frac{6}{2}\cdot 1{,}64\cdot 10^5\cdot 0{,}24\cdot\left(1-\left(\frac{1}{10}\right)^{1/3}\right) = 6{,}33\cdot 10^5(\text{Дж}).$$

Ответ: A = 633 кДж.

П р и м е р 14. В цилиндре под поршнем находится водород массой 20 г при температуре 27 °С. Водород расширился адиабатно, увеличив свой объем в пять раз. Найти изменение внутренней энергии газа, работу, совершенную газом, и количество теплоты, подведенной к газу. Изобразить процесс на диаграмме «давление – объем».

Дано:	СИ
m = 20 г	$m = 2\cdot 10^{-2}$ кг
$M = 2\cdot 10^{-3}$ кг/моль	
t_1 = 27 °С	T_1 = 300 К
$V_2 = 5\,V_1$	
i = 5	
ΔW – ?	
A – ?	
Q – ?	

Решение.

График процесса адиабатного расширения 1 – 2 согласно условию задачи изображен на диаграмме рис. 6.1 в PV-координатах.

Изменение внутренней энергии идеального газа в процессе 1 – 2 вычисляется по формуле:

$$\Delta W = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\left(T_2 - T_1\right), \qquad (6.7)$$

где i – число степеней свободы молекул газа.

При адиабатном процессе 1 – 2 температура и объем газа связаны между собой уравнением:

$$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}, \qquad (6.8)$$

где γ – постоянная адиабаты для двухатомного газа, $\gamma = \dfrac{i+2}{i} = 1{,}4$.

Из формулы (6.8) получим:

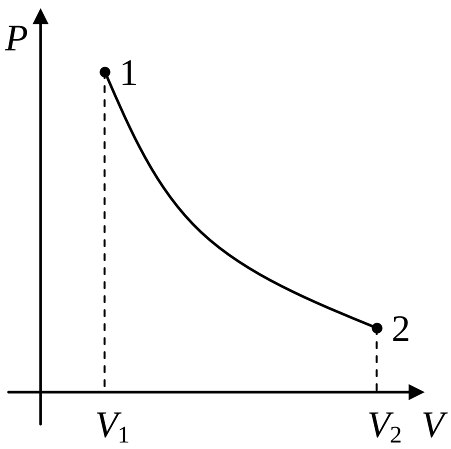

Рис. 6.1. График процесса

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1}. \tag{6.9}$$

Подставим формулу (6.9) в (6.7) и получим:

$$\Delta W = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R T_1 \left(\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} - 1 \right). \tag{6.10}$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\Delta W] = \frac{\text{кг}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К} = \text{Дж}.$$

Производим вычисления:

$$\Delta W = \frac{5}{2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8{,}31 \cdot 300 \cdot \left(\left(\frac{1}{5} \right)^{1{,}4 - 1} - 1 \right) = -29{,}6 \text{ (кДж)}.$$

Работу A газа при адиабатном расширении 1 – 2 вычисляем по формуле:

$$A = -\Delta W. \tag{6.11}$$

Адиабатный процесс протекает без обмена теплотой с окружающей средой, следовательно, $Q = 0$. Убедимся в этом на основе первого закона термодинамики, согласно которому теплота Q, переданная газу, равна сумме изменения внутренней энергии ΔW и работы A, совершенной газом:

$$Q = \Delta W + A. \tag{6.12}$$

Производим вычисления:

$$A = 29{,}6 \text{ кДж}.$$

$$Q = -29{,}6 + 29{,}6, = 0.$$

Ответ: $\Delta W = -29{,}6$ кДж; $A = 29{,}6$ кДж; $Q = 0$.

7. Энтропия

Энтропия наряду с давлением, объемом и температурой является функцией состояния системы, однако в отличие от этих трех функций состояния энтропия определена не только для равновесных состояний, но и для любых других.

Термодинамическим определением энтропии является формула, позволяющая определить лишь приращение энтропии:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \tag{7.1}$$

где δQ – количество теплоты, сообщенное системе на бесконечно малом участке какого-либо процесса при температуре T.

П р и м е р 15. Два моля идеального двухатомного газа изобарно нагрели так, что его объем увеличился в два раза. Определить приращение энтропии.

Дано:	*Решение.*
$\nu = 2$ моля $i = 5$ $\frac{V_2}{V_1} = 2$	Изменение энтропии в изобарном процессе (P = const)
$\Delta S - ?$	

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \nu c_{\nu P} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \nu c_{\nu P} \ln \frac{T_2}{T_1}, \tag{7.2}$$

где $c_{\nu P}$ – молярная теплоемкость при постоянном давлении,

$$c_{\nu P} = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) R. \tag{7.3}$$

Для изобарного процесса $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$, откуда

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}. \tag{7.4}$$

Подставив выражения (7.3) и (7.4) в формулу (7.2), получим искомое изменение энтропии:

$$\Delta S = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \nu R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}. \tag{7.5}$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\Delta S] = \text{моль} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Производим вычисления:

$$\Delta S = \left(\frac{5}{2}+1\right)\cdot 2\cdot 8{,}31\cdot \ln 2 = 40{,}3\ (\text{Дж/К}).$$

Ответ: ΔS = 40,3 Дж/К.

П р и м е р 16. Два килограмма льда, находящегося при температуре –13 °С, нагрели и превратили в пар. Определить изменение энтропии в этом процессе.

Дано:	СИ
m = 2 кг	
t_1 = –13 °С	T_1 = 260 К
t_2 = 0 °С	T_2 = 273 К
c_1 = 2100 Дж/(кг·К)	
λ = 330 кДж/кг	$\lambda = 3{,}3\cdot 10^5$ Дж/кг
c_2 = 4190 Дж/(кг·К)	
t_3 = 100 °С	T_3 = 373 К
r = 2,25 МДж/кг	$r = 2{,}25\cdot 10^6$ Дж/кг
ΔS – ?	

Решение.

Весь процесс можно разбить на четыре отдельных процесса: нагревание льда от температуры T_1 до температуры плавления T_2; плавление льда при постоянной температуре T_2; нагревание воды, образовавшейся при плавлении льда, до температуры кипения T_3; превращение воды в пар при постоянной температуре T_3.

Общее изменение энтропии ΔS равно сумме изменений энтропии, происходящих на отдельных стадиях процесса:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4. \tag{7.6}$$

Процесс нагревания твердого вещества (льда) происходит при неизменном объеме ($\delta A = 0$), следовательно, изменение энтропии в этом процессе

$$\Delta S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_1}{T} = \int_1^2 \frac{dW}{T} = mc_1\int_{T_1}^{T_2}\frac{dT}{T} = mc_1 \ln\frac{T_2}{T_1}, \tag{7.7}$$

где c_1 – удельная теплоемкость льда (в этой области температур c_1 = const = = 2100 Дж/(кг·К)).

Изменение энтропии ΔS_2 при плавлении льда (T_2 = const)

$$\Delta S_2 = \int_2^3 \frac{\delta Q_2}{T} = \frac{1}{T_2}\int_2^3 \delta Q_2 = \frac{Q_{2\text{-}3}}{T_2} = \frac{m\lambda}{T_2}, \tag{7.8}$$

где λ – удельная теплота плавления льда, λ = 330 кДж/кг.

Изменение энтропии ΔS_3 при нагревании воды от T_1 до температуры кипения T_3 (процесс происходит без изменения объема) рассчитываем по формуле:

$$\Delta S_3 = \int_3^4 \frac{\delta Q_3}{T} = mc_2 \ln\frac{T_3}{T_2}, \tag{7.9}$$

где c_2 – удельная теплоемкость воды (в этой области температуры c_2 = const = = 4190 Дж/(кг·К)).

И, наконец, изменение энтропии ΔS_4 при превращении воды в пар

$$\Delta S_4 = \int_4^5 \frac{\delta Q_4}{T} = \frac{1}{T_3}\int_4^5 \delta Q_4 = \frac{Q_{4\text{-}5}}{T_3} = \frac{mr}{T_3}, \tag{7.10}$$

где r – удельная теплота парообразования воды.

Таким образом, общее изменение энтропии в данном процессе

$$\Delta S = m\left(c_1 \ln\frac{T_2}{T_1} + \frac{\lambda}{T_2} + c_2 \ln\frac{T_3}{T_2} + \frac{r}{T_3}\right). \tag{7.11}$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\Delta S] = \text{кг}\cdot\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Производим вычисления:

$$\Delta S = 2\cdot\left(2100\cdot\ln\frac{273}{260} + \frac{3{,}3\cdot 10^5}{273} + 4190\cdot\ln\frac{373}{273} + \frac{2{,}25\cdot 10^6}{373}\right) = 17{,}3 \text{ (кДж/К)}.$$

Ответ: ΔS = 17,3 кДж/К.

8. Цикл Карно. КПД цикла Карно.

Тепловой двигатель функционирует таким образом, что рабочее тело (идеальный газ) получает некоторое количество теплоты $Q_н$ от нагревателя при температуре $T_н$, затем совершает полезную работу A и отдает некоторое количество теплоты $Q_х$ холодильнику, температура которого $T_х$. Важнейшая количественная характеристика эффективности теплового двигателя, как и любого технического устройства, это его коэффициент полезного действия (КПД) η. Он определяется по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q_н} = \frac{Q_н - Q_х}{Q_н}, \qquad (8.1)$$

где полезная работа $A = Q_н - Q_х$.

Циклический процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, назван циклом Карно, а тепловой двигатель, работающий по циклу Карно, – идеальным тепловым двигателем. Теоретическая модель Карно позволяет рассчитать максимально возможный КПД при данных значениях температуры $T_н$ нагревателя $T_н$ и холодильника $T_х$:

$$\eta_К = 1 - \frac{T_х}{T_н}. \qquad (8.2)$$

П р и м е р 17. В тепловой машине температура нагревателя $T_н$ = 600 К, температура холодильника на ΔT = 200 К меньше, чем у нагревателя. Каков максимальный КПД?

Дано:	*Решение.*
ΔT = 200 К $T_н$ = 600 К	Максимально возможный КПД при данных значениях температуры нагревателя $T_н$ и холодильника $T_х$ определяется по формуле (8.2), где $T_х = T_н - \Delta T$.
η – ?	

Получим формулу для расчета КПД:

$$\eta_К = 1 - \frac{T_н - \Delta T}{T_н}. \qquad (8.3)$$

Производим вычисления:

$$\eta_К = 1 - \frac{600 - 200}{600} = \frac{1}{3} = 0,33.$$

Ответ: $\eta = 0,33$.

П р и м е р 18. Температура нагревателя идеального теплового двигателя Карно $t_н$ = 227 ºС, а температура холодильника $t_х$ = 27 ºС. Рабочее тело двигателя за цикл совершает работу A = 10 кДж. Чему равно количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя за цикл?

Дано:	СИ
A = 10 кДж;	$A = 10^4$ Дж
$t_х$ = 27 ºС	$T_х$ = 300 К
$t_н$ = 227 ºС	$T_н$ = 500 К
η – ?	

Решение.

Количество теплоты $Q_н$, полученное рабочим телом от нагревателя, определим из формулы (8.1):

Определим КПД цикла:

$$\eta = \frac{A}{Q_н}. \qquad (8.4)$$

Подставим в уравнение (8.4) формулу (8.1), которая позволяет найти КПД цикла. Получим:

$$Q_н = \frac{T_н}{T_н - T_х} A. \qquad (8.5)$$

Производим вычисления:

$$Q_н = \frac{500}{500 - 300} \cdot 10^4 = 25 \text{ (кДж)}.$$

Ответ: $Q_н = 25$кДж.

П р и м е р 19. Тепловая машина, работающая по циклу Карно, получает от нагревателя за один цикл количество теплоты 2,5 кДж. Значения температуры нагревателя и холодильника – 400 и 300 К соответственно. Найти: 1) коэффициент полезного действия машины; 2) работу, совершаемую машиной за один цикл; 3) количество теплоты, отдаваемое холодильнику за один цикл.

Дано:	СИ
$Q_н = 2{,}5$ кДж	$Q_н = 2{,}5 \cdot 10^3$ Дж
$T_х = 300$ K	
$T_н = 400$ K	
η – ?	
A – ?	
$Q_х$ – ?	

Решение.

КПД цикла Карно при данных значениях температуры нагревателя $T_н$ и холодильника $T_х$ определяется по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{T_х}{T_н}. \tag{8.6}$$

Работу, совершенную тепловой машиной за один цикл, выразим из уравнения (8.1):

$$A = \eta\, Q_н \tag{8.7}$$

С учетом выражения (8.6) получим формулу для определения работы:

$$A = \left(1 - \frac{T_х}{T_н}\right) Q_н. \tag{8.8}$$

Количество теплоты, отдаваемое холодильнику за один цикл, выразим также из уравнения (8.1)

$$Q_х = Q_н - A. \tag{8.11}$$

Подставив выражение (8.8) в формулу (8.9), получим:

$$Q_х = Q_н - \left(1 - \frac{T_х}{T_н}\right) Q_н = \frac{T_х}{T_н} Q_н. \tag{8.10}$$

Производим вычисления:

$$\eta_К = 1 - \frac{300}{400} = 0{,}25.$$

$$A = \left(1 - \frac{300}{400}\right) \cdot 2{,}5 \cdot 10^3 = 0{,}625 \text{ (кДж)};$$

$$Q_х = 2{,}5 \cdot 10^3 - 0{,}625 \cdot 10^3 = 1{,}88 \text{ (кДж)}.$$

Ответ: $\eta = 0{,}25$ (или 25 %), $A = 0{,}625$ кДж, $Q_х = 1{,}88$ кДж.

Библиографический список

1. О с е л е д ч и к Ю. С. Физика. Модульный курс для технических вузов / Ю. С. О с е л е д ч и к, П. И. С а м о й л е н к о, Т. Н. Т о ч и л и н а. М.: Юрайт, 2012. 525 с.

2. К р о х и н С. Н. Краткий курс физики: Конспект лекций / С. Н. К р о х и н, Л. А. Л и т н е в с к и й / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. Ч. 1. 38 с.

3. Т р о ф и м о в а Т. И. 500 основных законов и формул: Справочник / Т. И. Т р о ф и м о в а. М., 2003. 63 с.

4. Ч е р т о в А. Г. Задачник по физике / А. Г. Ч е р т о в, А. А. В о р о б ь е в. М., 2001. 640 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица П.1

Десятичные приставки

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
деци	д	10^{-1}	дека	да	10^{1}
санти	с	10^{-2}	гекто	г	10^{2}
милли	м	10^{-3}	кило	к	10^{3}
микро	мк	10^{-6}	мега	М	10^{6}
нано	н	10^{-9}	гига	Г	10^{9}
пико	п	10^{-12}	тера	Т	10^{12}

Таблица П.2

Молярная масса и число степеней свободы молекул газа

Газ	Молярная масса М, г/моль	Число степеней свободы i
Водород H_2	2	5
Гелий He	4	3
Аммиак NH_3	17	6
Азот N_2	28	5
Кислород O_2	32	5
Аргон Ar	40	3
Углекислый газ CO_2	44	6

Таблица П.3

Плотность и тепловые свойства веществ

Вещество	Плотность, г/см^3	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, МДж/кг	Удельная теплота парообразования, МДж/кг
Вода	1,00	4,19	–	2,25
Лед	0,90	2,10	0,33	–

П р и м е ч а н и я.

1. Универсальная газовая постоянная R = 8,31 Дж/(моль·К).

2. Постоянная Больцмана $k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

3. Постоянная Авогадро $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

4. Нормальные условия: давление P_o = 760 мм рт. ст., температура $t°$ = 0°С.

5. 1 мм рт. ст. = 133 Па; 1 атм = 10^5 Па; 1 л = 10^{-3} м^3; $T = t + 273$.

6. 1 ккал = 4186,8 Дж.

Учебное издание

ВОЗНЮК Сергей Викторович,
МИНАБУДИНОВА Сания Анасовна,
ХМЫРОВА Наталья Анатольевна

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА
(ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ)

Учебно-методическое пособие

Редактор Н. А. Майорова

***

Подписано в печать 01.03.2018. Формат 60 × 84 $^{1}/_{16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,3.
Тираж 800 экз. Заказ .

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35