

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения»

Кафедра «Физика и теоретическая механика»

И.А. Коростелева, Г.В. Куликова

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

Методические указания  
к решению задач по физике

Хабаровск  
Издательство ДВГУПС  
2014

УДК 539.19 (075.8)  
ББК В 36 я73  
К 686

Рецензент – кандидат физико-математических наук,  
профессор кафедры «Физика и теоретическая механика»  
Дальневосточного государственного университета путей сообщения  
*Д.С. Фалеев*

**Коростелева, И.А.**

**К 686** Молекулярная физика и термодинамика : метод. указания к решению задач по физике / И.А. Коростелева, Г.В. Куликова. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. – 39 с.: ил.

Методические указания разработаны в соответствии с рабочей программой дисциплины «Физика».

Изложены основные законы, положения и формулы по вопросам молекулярной физики и термодинамики, приведены примеры решения задач, задачи для самостоятельной работы по основным темам данного раздела физики, контрольные вопросы для проверки усвоения изложенного материала.

Предназначены для студентов всех форм обучения 1-го и 2-го курсов инженерно-технических специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

**УДК 539.19 (075.8)**  
**ББК В 36 я73**

© ДВГУПС, 2014

## **ВВЕДЕНИЕ**

При подготовке инженеров для различных отраслей экономики важную роль как одна из фундаментальных наук играет физика. Знание основ молекулярной физики и термодинамики необходимо нам и в повседневной жизни.

Цель настоящих указаний помочь студенту – будущему специалисту не только освоить теоретические основы одного из базовых разделов физики, но и научить практически применять полученные знания.

Приобретение навыка решения задач студентами инженерно-технических специальностей – необходимое условие для их дальнейшей успешной трудовой деятельности.

# 1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

## 1.1. Молекулярно-кинетическая теория газов.

### Законы идеальных газов

1. Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества:

- все тела состоят из мельчайших частиц – атомов и молекул;
- атомы и молекулы находятся в состоянии непрерывного хаотического движения;
- молекулы различных веществ взаимодействуют между собой по-разному, характер взаимодействия зависит от типа молекул и расстояния между ними.

Наиболее яркими и прямыми подтверждениями основных положений МКТ можно считать *броуновское движение* и *диффузию*.

**Идеальный газ** – это газ, в котором можно пренебречь собственным объемом молекул и потенциальной энергией их взаимодействия, а удары молекул можно считать абсолютно упругими.

*Количество вещества*  $\nu$  – число структурных элементов (молекулы, атомы, ионы и т. п.), содержащихся в системе или теле. Количество вещества выражается в молях. Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг

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

где  $N$  – число молекул (структурных элементов, составляющих систему);  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – постоянная Авогадро.

Молярная масса  $\mu$  вещества

$$\mu = \frac{m}{\nu},$$

где  $m$  – масса однородного тела (системы).

Относительная молекулярная масса вещества

$$M_r = \sum_i n_i A_{r,i},$$

где  $n_i$  – число атомов  $i$ -го химического элемента, входящего в состав молекулы данного вещества;  $A_{r,i}$  – относительная атомная масса (приводится в таблице Д.И. Менделеева) этого элемента.

Связь молярной массы  $\mu$  с относительной молекулярной массой вещества

$$\mu = kM_r,$$

где  $k = 10^{-3}$  кг/моль.

## 2. Основное уравнение МКТ. Газовые законы

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов связывает давление газа  $p$  с характеристиками хаотического движения молекул.

Уравнение Клапейрона–Менделеева (уравнение состояния идеального газа):

$$pV = \frac{m}{\mu}RT,$$

где  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $\mu$  – молярная масса;  $m$  – масса газа.

Масса одной молекулы  $m_0$  любого вещества

$$m_0 = \frac{\mu}{N_A}.$$

Число молекул  $n$  в единице массы вещества

$$n_1 = \frac{N_A}{\mu}.$$

Число молекул  $N$  в данной массе  $m$  вещества

$$N = \frac{m}{\mu}N_A.$$

Число  $n$  молекул в единице объема вещества

$$n = \frac{N_A}{\mu}\rho,$$

где  $\rho$  – плотность вещества.

Концентрация частиц (молекулы, атомы и т. п.) однородной системы

$$n = N/V,$$

где  $V$  – объем системы.

Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры

$$p = nkT,$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана ( $k = R/N_A$ );  $T$  – термодинамическая температура.

*Температура* есть одна из макроскопических характеристик состояния тел. Если два тела, температура которых при оценке с помощью наших органов чувств сильно отличается друг от друга, привести в соприкосновение друг с другом, то опыт показывает, что одно тело будет нагреваться, а другое охлаждаться, пока не прекратятся в системе всякие макроскопические изменения. Тогда говорят, что эти два тела находятся в термодинамическом равновесии друг с другом и имеют одинаковую температуру.

*Абсолютный нуль* может быть определен как такая температура, при которой в теле прекращается тепловое движение и остается только движение частиц, связанное с нулевой энергией. Абсолютный нуль является самой низкой из всех возможных температур.

Температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, называется абсолютной температурой. Единицей температуры абсолютной шкалы температур является Кельвин (сокращенно К). Наряду с абсолютной температурной шкалой в физике употребляется также шкала Цельсия. Шкала Цельсия отличается от абсолютной шкалы положением. Если  $t$  – температура в градусах Цельсия, а  $T$  – абсолютная температура в Кельвинах, то приближенно

$$t = T - 273,15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Объединенный газовый закон: произведение давления  $p$  на объем  $V$ , деленное на абсолютную температуру  $T$ , для данной массы газа есть величина постоянная

$$\frac{pV}{T} = \text{const}.$$

В случае двух состояний

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const},$$

где  $p_1, V_1, T_1$  – параметры, определяющие начальное состояние;  $p_2, V_2, T_2$  – параметры, определяющие конечное состояние.

Нормальными называют условия, соответствующие  $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $p = 1 \text{ атм}$ . Или в системе СИ:  $T = 273,15 \text{ К}$  и  $p = 101,3 \text{ кПа}$ .

С помощью уравнения состояния для **данной массы газа**  $m$  любую из трех величин  $p, V, T$  можно выразить через две остальные. Поэтому состояние газа можно изобразить точкой на координатной плоскости  $p, V$  (или  $V, T$  или  $p, T$ ). Любой равновесный процесс, происходящий с газом, представляется на такой плоскости в виде линии. Среди различных газовых процессов можно выделить такие, в которых одна из величин  $p, V$  или  $T$  поддерживается постоянной.

*Изотермическими* называются процессы, в которых температура постоянна:  $T = const$ . Для таких процессов из уравнения состояния следует *закон Бойля–Мариотта*:

$$pV = const.$$

Для любых двух состояний при изотермическом процессе

$$p_1V_1 = p_2V_2.$$

При *изохорных* процессах постоянным поддерживается объем газа:  $V = const$ . В этом случае уравнение состояния выражает *закон Шарля*:

$$p = p_0(1 + \gamma t) = p_0\gamma T, \text{ или } p/T = const,$$

где  $p$  – давление газа при  $t$  °С;  $p_0$  – давление газа при 0 °С;  $\gamma$  – температурный коэффициент давления:  $\gamma = \frac{1}{273} K^{-1}$  для всех газов. Для любых двух состояний газа при изохорном процессе

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

В *изобарных* процессах постоянно давление:  $p = const$ . Из уравнения состояния при этом следует *закон Гей–Люссака*:

$$V = V_0(1 + \alpha t) \approx V_0\alpha T, \text{ или } V/T = const,$$

где  $V$  – объем газа при  $t$  °С;  $V_0$  – объем газа при 0 °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент температурного расширения:  $\alpha = \frac{1}{273} K^{-1}$  для всех газов.

Для любых двух состояний газа при изобарном процессе

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

Графики изотермических, изохорных и изобарных процессов в различных координатах показаны на рис. 1.1.

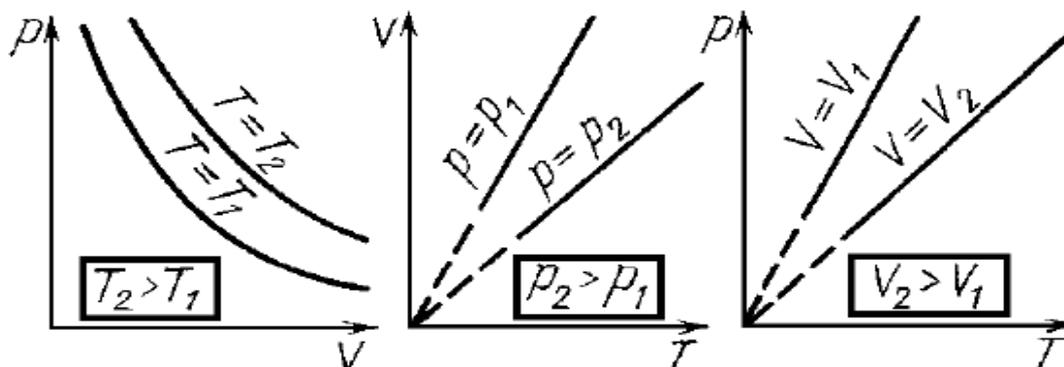


Рис. 1.1. Графики изопроцессов

*Закон Дальтона.* Давление  $p$  смеси различных газов равно сумме парциальных давлений  $p_i$  газов, составляющих смесь:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_i.$$

Парциальное давление газа  $p_i$  это давление, которое оказывал бы  $i$ -й газ на стенку сосуда газ, если бы других газов не было.

Молярная масса смеси газов определяется по формуле

$$\mu = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n},$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го газа, входящего в смесь;  $\nu_i = \frac{m_i}{\mu_i}$  – число молей  $i$ -го газа, находящегося в смеси;  $n$  – число различных газов в смеси.

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Сколько молекул содержится в  $1 \text{ м}^3$  воды? Какова масса молекулы? Плотность воды  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

*Дано:*  $V = 1 \text{ м}^3$ ;  $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ ;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ ;  $N$  – ?;  $m_0$  – ?

*Решение*

Если число молекул  $N$ , содержащихся в некоторой массе  $m$  любого вещества, то

$$m = Nm_0,$$

где  $m_0$  масса одной молекулы.

Известно, что в одном моле вещества (в данном случае, воды) содержится число молекул, равное числу Авогадро  $N_A$ .

Молярная масса  $\mu$  вещества

$$\mu = N_A m_0.$$

Находим число молекул  $N$  воды

$$N = N_A \frac{m}{\mu}.$$

Выразив в этой формуле массу воды как произведение плотности  $\rho$  и объема  $V$ , получим:

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

Плотность  $\rho$  и число Авогадро берем из таблиц.

$$N = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{10^3 \cdot 1}{18 \cdot 10^{-3}} = 3,34 \cdot 10^{28} \text{ (молекул)}.$$

Массу молекулы  $m_0$  находим из второго уравнения:

$$m_0 = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{602 \cdot 10^{23}} = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ (кг)}.$$

Ответ:  $N = 3,34 \cdot 10^{28}$ ;  $m_0 = 2,99 \cdot 10^{-26}$  кг.

**Пример 2.** Определить объем сосуда, в котором находится смесь из 1 кг кислорода и 2 кг азота при нормальных условиях. Каков молекулярный вес  $\mu_{см}$  смеси газов?

Дано:  $m_1 = 1$  кг;  $m_2 = 2$  кг;  $\mu_1 = 32 \cdot 10^{-3}$  кг/моль;  $\mu_2 = 28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль;  $p = 1$  атм =  $1,013 \cdot 10^5$  Па;  $T = 273$  К;  $R = 8,31$  Дж/(моль · К).  $V = ?$   $\mu_{см} = ?$

Решение

Обозначим через  $m_1$  и  $\mu_1$  массу и молекулярный вес кислорода, а  $m_2$  и  $\mu_2$  массу и молекулярный вес азота.

Для смеси газов выполняется закон Дальтона

$$p = p_1 + p_2,$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — соответственно парциальные давления кислорода и азота, определяемые из уравнения Менделеева–Клапейрона.

$$p_1 = \frac{m_1}{\mu_1 V} RT_1, \quad p_2 = \frac{m_2}{\mu_2 V} RT_2,$$

где  $V$  — объем сосуда, в котором находятся газы;  $T_1 = T_2 = T$  — абсолютная температура смеси;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Давление смеси газов:

$$p = \frac{m_{см}}{\mu_{см} V} RT,$$

где  $m_{см}$  — масса смеси газов, кг;  $\mu_{см}$  — молярная масса смеси (молекулярный вес смеси газов), кг/моль.

$$\frac{m_{см}}{\mu_{см}} = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2},$$

или

$$\mu_{см} = \frac{(m_1 + m_2)\mu_1\mu_2}{m_1\mu_2 + m_2\mu_1}.$$

Проводим вычисления в системе СИ.

$$\mu_{см} = \frac{(1+2) \cdot 28 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 32 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 28 \cdot 10^{-3}} = 30,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Объем сосуда со смесью газов определяем

$$V = \frac{RT}{p} \cdot \frac{m_{см}}{\mu_{см}},$$

$$V = \frac{8,31 \cdot 273 \cdot 3}{1,013 \cdot 10^5 \cdot 30,5} = 2,2 \text{ (м}^3\text{)}.$$

*Ответ:*  $V = 2,2 \text{ м}^3$ ;  $\mu_{см.} = 30,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ .

**Пример 3.** Камеру автомобильной шины накачивают с помощью насоса, работающего от двигателя. Сколько времени потребуется, чтобы накачать камеру от давления  $p_0 = 105 \text{ Па}$  до давления  $p = 0,5 \text{ МПа}$ , если объем камеры  $V = 6 \text{ л}$ , при каждом ходе насос захватывает из атмосферы столб воздуха высотой  $h = 10 \text{ см}$  и диаметром  $d = 10 \text{ см}$ . Время одного качания  $t_0 = 1,5 \text{ с}$ . Температуру считать постоянной.

*Дано:*  $p_0 = 105 \text{ Па}$ ;  $p = 0,5 \text{ МПа}$ ;  $V = 6 \text{ л}$ ;  $h = 10 \text{ см}$ ;  $d = 10 \text{ см}$ ;  $t_0 = 1,5 \text{ с}$ ;  
 $T = \text{const}$ ;  $t - ?$

*Решение*

Объем воздуха, засасываемого при каждом ходе насоса,  $V_0 = \frac{h\pi d^2}{4}$ , его давление  $p_0$ .

Парциальное давление каждой засасываемой массы воздуха можно найти по уравнению изотермического процесса:  $p' = \frac{V_0 p_0}{V}$ .

Сумма парциальных давлений всех порций воздуха, добавляемых в камеру за  $n$  ходов насоса равна

$$np' = \frac{n\pi d^2 h}{4V} p_0.$$

Сложив эту величину с начальным давлением  $p_0$  в камере, найдем конечное давление:  $p = p_0 + \frac{n\pi d^2 h p_0}{4V}$ .

Отсюда число ходов насоса, необходимых для получения давления  $p$  в камере:  $n = \frac{4V(p - p_0)}{\pi d^2 h p_0}$ .

Время откачивания камеры

$$t = n\tau = \frac{4V\tau(p - p_0)}{\pi d^2 h p_0} = \frac{4 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot (0,5 \cdot 10^6 - 10^5)}{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 0,1 \cdot 10^5} = 46 \text{ с.}$$

Ответ: 46 с.

### Задачи для самостоятельного решения

1. В сосуде находится смесь 10 г углекислого газа и 15 г азота. Найти плотность этой смеси при температуре 27 °С и давлении  $1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ . (Ответ: 1,98 кг/м<sup>3</sup>).

2. 12 г газа занимают объем  $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  при температуре 7 °С. После нагревания газа при постоянном давлении его плотность стала равна  $6 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$ . До какой температуры нагрели газ? (Ответ: 1400 К).

3. В сосуде объемом  $V = 0,3 \text{ л}$  при температуре  $T = 290 \text{ К}$  находится некоторый газ. На сколько понизится давление  $p$  газа в сосуде, если из него из-за утечки выйдет  $N = 10^{19}$  молекул? (Ответ: на 133 Па).

4. Определить молярную массу  $M$  смеси кислорода массой  $m_1 = 25 \text{ г}$  и азота массой  $m_2 = 75 \text{ г}$ . (Ответ:  $28,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ ).

5. В баллоне находится 2,8 кг газа при температуре 390 К. Какую массу газа нужно удалить из баллона, чтобы при нагревании оставшегося газа до температуры 840 К давление в баллоне возросло в полтора раза? (Ответ: 0,85 кг).

6. В баллоне содержится  $m = 2,4 \text{ кг}$  газа при температуре  $T_1 = 300 \text{ К}$ . Какую массу газа нужно удалить из баллона, чтобы при нагревании оставшегося газа до температуры  $T_2 = 450 \text{ К}$  давление в баллоне осталось прежним? (Ответ: 0,8 кг).

7. Баллон емкостью 0,5 л, содержащий воздух при нормальных условиях, герметически закрывают, после чего нагревают до температуры 400 °С. Определить давление воздуха в баллоне при этой температуре. На сколько процентов увеличится давление газа в нагретом сосуде, если перед герметизацией в него попадает 99 г воды? (Ответ:  $2,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 220 %).

8. При взрыве атомной бомбы, содержащей 1 кг плутония, получается одна радиоактивная частица на каждый атом плутония. Предполагая, что ветры равномерно разносят продукты взрыва по всей атмосфере, определите, сколько радиоактивных частиц будет содержаться в  $1 \text{ дм}^3$  воздуха у поверхности Земли? Молярная масса плутония 244 г/моль. (Ответ: 700).

9. Найти плотность  $\rho$  газовой смеси, состоящей по массе из одной части водорода и восьми частей кислорода при давлении  $P = 100 \text{ кПа}$  и температуре  $T = 300 \text{ К}$ . (Ответ:  $0,481 \text{ кг/м}^3$ ).

10. В баллоне объемом  $V = 10$  литров находится гелий под давлением  $p_1 = 1$  МПа и при температуре  $T_1 = 300$  К. после того, как из баллона было взято  $m = 10$  г гелия, температура в баллоне понизилась до  $T_2 = 290$  К. Определить давление  $p_2$  гелия, оставшегося в баллоне. (Ответ: 0,36 МПа ).

11. Определить молярную массу газа, если при температуре  $T = 300$  К и давлении  $p = 0,2$  МПа он имеет плотность  $\rho = 2,41$  кг/м<sup>3</sup>. (Ответ:  $\mu = 0,03$  кг/моль).

12. Смесь водорода и азота общей массой 290 г при температуре 600 К и давлении 2,46 МПа занимает объем 30 л. Определить массу водорода и азота. (Ответ: 0,01 кг; 0,28 кг).

13. В сосуде объемом 5 л при нормальных условиях находится азот. Определить: 1) количество вещества; 2) массу азота в сосуде; 3) концентрацию молекул азота. (Ответ: 0,22 моль;  $6,24 \cdot 10^{-3}$  кг;  $2,69 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>).

14. Резиновый шар содержит 2 л воздуха, находящегося при температуре 20 °С и атмосферном давлении 10<sup>5</sup> Па. Какой объем займет воздух, если шар будет опущен в воду на глубину 10 м? температура воды 4 С. (Ответ:  $9 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>).

15. Какой объем занимает смесь азота массой  $m_1 = 1$  кг и гелия массой  $m_2 = 1$  кг при нормальных условиях? (Ответ: 6,42 м<sup>3</sup>).

16. Плотность смеси гелия и аргона при давлении  $p = 1,5 \cdot 10^5$  Па и температуре  $t = 27$  °С равна  $\rho = 2$  кг/м<sup>3</sup>. Определить концентрацию атомов гелия в смеси газов. Молярная масса гелия  $\mu_1 = 0,004$  кг/моль, аргона –  $\mu_2 = 0,04$  кг/моль. (Ответ:  $5,6 \cdot 10^{24}$  м<sup>-3</sup>).

17. Тонкостенный резиновый шар радиусом  $r_1 = 0,02$  м наполнен воздухом при температуре  $t_1 = 200$  °С и давлении  $p_1 = 10^5$  Па. Определить радиус шара  $r_2$ , если его опустить в воду с температурой  $t_2 = 4$  °С на глубину  $h = 20$  м. Атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па. Плотность воды  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. (Ответ: 0,0137 м).

18. Воздушный шарик внесли с улицы, где температура воздуха была  $t_1 = -13$  °С, в комнату с температурой  $t_2 = 17$  °С? На сколько процентов изменится объем шарика? Натяжением резины пренебречь. [11,5 %].

19. Одна треть молекул азота массой  $m = 10$  г распалась на атомы. Определить полное число частиц  $N$ , находящихся в газе. Молярная масса азота  $\mu = 28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. (Ответ:  $2,87 \cdot 10^{20}$ ).

20. Во сколько раз плотность  $\rho_1$  воздуха, заполняющего помещение зимой ( $t_1 = 7$  °С), больше его плотности  $\rho_2$  летом ( $t_2 = 27$  °С)? Давление газа считать постоянным. (Ответ: 1,07).

## 1.2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов. Статистические закономерности

Основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов называется уравнение, устанавливающее связь между давлением газа, его объемом и энергией.

Давление газа на стенку сосуда складывается из отдельных ударов молекул о стенку

$$p = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2,$$

где  $n$  – число молекул в единице объема;  $m$  – масса молекулы;  $\bar{v}^2$  – среднее значение квадрата скорости молекул.

Обозначая  $\frac{m\bar{v}^2}{2} = \bar{E}_{кин}$ , получим *уравнение Клаузиуса* – основное уравнение кинетической теории газов

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_n \rangle = \frac{2}{3} \frac{E}{V} = \frac{2}{3} n E,$$

где  $p$  – давление газа;  $\langle E_n \rangle$  – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы;  $E$  – суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул газа, содержащихся в объеме  $V$ . Из молекулярно-кинетической теории следует, что значения средней кинетической энергии поступательного движения молекул любых двух тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, равны. Поэтому температуру определяют по формуле

$$E_{cp} = \frac{3}{2} kT,$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

При своем движении молекулы идеального газа, сталкиваясь друг с другом, беспорядочно меняют как величину, так и направление своей скорости. Тем не менее, для характеристики состояния движения всей совокупности огромного числа молекул, пользуются понятиями:

1) наиболее вероятной скорости  $v_e$ ; 2) средней арифметической скорости  $v_{cp}$ ; 3) средней квадратичной скорости  $v_{кв}$ .

- Наиболее вероятная скорость

$$v_e = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}.$$

- Средняя арифметическая скорость

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m_0}} .$$

- Средняя квадратичная скорость

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} ,$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура газа,  $M$  – масса одного моля газа,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $m_0$  – масса одной молекулы газа.

- Средняя длина свободного пробега молекул газа

$$\lambda_{cp} = \frac{v_{cp}}{z_{cp}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} ,$$

где  $v_{cp}$  – средняя арифметическая скорость молекул;  $z_{cp}$  – среднее число столкновений молекулы с остальными в единицу времени;  $d$  – эффективный диаметр молекулы;  $n$  – число молекул в единице объема.

Коэффициент диффузии:

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle ,$$

здесь  $\langle v \rangle$  – среднеквадратичная скорость молекул,  $\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул.

*Закон Максвелла* распределения молекул по скоростям:

$$\Delta N = \frac{4}{\sqrt{\pi}} N U^2 e^{-U^2} \Delta U ,$$

где  $\Delta N$  – число молекул, относительные скорости которых находятся в интервале от  $U$  до  $U + \Delta U$ ;  $N$  – общее число молекул;  $U = \frac{v}{v_g}$  – относительная скорость, отношение скорости молекулы  $v$  к наиболее вероятной скорости  $v_g$ .

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Коэффициент диффузии кислорода при  $t = 0$  °С и  $p = 101,3$  кПа равен  $D = 1,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. Оценить среднюю длину свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  молекул кислорода при тех же условиях.

Дано:  $t = 0$  °С;  $p = 101,3$  кПа;  $D = 1,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $\langle \lambda \rangle$  – ?

Решение

Коэффициент диффузии:

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle,$$

здесь  $\langle v \rangle$  – среднеквадратичная скорость молекул,  $\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул.

Среднеквадратичная скорость

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Тогда

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3D}{\langle v \rangle} = 3D \sqrt{\frac{M}{3RT}}.$$

Поскольку давление газа

$$p = nkT,$$

то

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3D}{\langle v \rangle} = 3D \sqrt{\frac{M}{3RT}}.$$

Произведем расчет

$$\langle \lambda \rangle = 3D \sqrt{\frac{M}{3RT}} = 3 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{32 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 8,31 \cdot 273}} = 1,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Ответ:  $1,17 \cdot 10^{-5}$  м.

**Пример 2.** Найти среднее число столкновений в 1 секунду молекул углекислого газа при температуре  $t = 100$  °С если длина свободного пробега при этих условиях равна  $8,7 \times 10^2$  см.

Дано:  $t = 100$  °С ( $T = 373$ К);  $\bar{l} = 8,7 \times 10^2$  см =  $8,7 \times 10^{-4}$  м;  $\bar{Z}$  – ?

Решение

Среднее число столкновения в единицу времени рассчитывается по формуле

$$\bar{Z} = \frac{\bar{v}}{\bar{l}},$$

где  $\bar{v}$  – средняя арифметическая скорость молекул;  $\bar{l}$  – средняя длина свободного пробега. В свою очередь скорость  $\bar{v}$  находится по формуле

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}},$$

где  $\mu = (12 + 2 \times 16) \times 0,001 = 0,044$  кг/моль – молярная масса углекислого газа  $CO_2$ .

$$\bar{Z} = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}.$$

Проверка размерности:

$$[\bar{Z}] = \frac{1}{\text{м}} \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \times \text{К}} \times \text{К} \times \frac{\text{моль}}{\text{кг}}} = \frac{1}{\text{м}} \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \frac{1}{\text{м}} \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{1}{\text{м}} \times \frac{\text{м}}{\text{с}} = \text{с}^{-1}.$$

Подставляем данные:

$$\bar{Z} = \frac{1}{8,7 \times 10^{-4}} \sqrt{\frac{8 \times 8,31 \times 373}{3,14 \times 0,044}} = 4,9 \times 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

Ответ:  $4,9 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ .

**Пример 3.** Найти среднюю длину свободного пробега молекулы азота в сосуде объемом 6 л. Масса газа 0,5 г.

Дано:  $d = 3 \times 10^{-8}$  см =  $3 \times 10^{-11}$  м;  $p = 10^5$  Па;  $T = 273$  К;  $\langle \ell \rangle$  – ?

Решение

Средняя длина свободного пробега молекул газа выражается формулой

$$\langle \ell \rangle = 1 / \sqrt{2} \pi d^2 n, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр молекулы;  $n$  – концентрация молекул.

Концентрация молекул связана с давлением и температурой газа выражением:

$$n = p/kT, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К).

Из уравнения Менделеева–Клайперона можем записать:

$$\frac{P}{T} = \frac{m \cdot R}{M \cdot V}, \quad (3)$$

где  $V$  – объем газа;  $R$  – молярная газовая постоянная;  $m$  и  $M$  – масса и молярная масса газа соответственно.

Подставляя (3) в (2), а затем в выражение (1), получим:

$$\langle \ell \rangle = \frac{k \cdot M \cdot V}{\sqrt{2} \pi d^2 m \cdot R}. \quad (4)$$

Вычисления по формуле (4) дают

$$\langle \ell \rangle = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 0,028 \times 8,31}{\sqrt{2} \times 3.14 \times (3 \times 10^{-10})^2 \times 0,0005 \times 8,31} = 1,9336 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

Ответ:  $\langle \ell \rangle = 1,9336 \times 10^{-3}$  м.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Два одинаковых сосуда, содержащие одинаковое число молекул азота, соединены трубкой с краном. В первом сосуде средняя скорость движения молекул  $v_1 = 400$  м/с, а во втором  $v_2 = 500$  м/с. Какова будет средняя скорость молекул, если кран открыть? Система изолирована. (Ответ:  $\cong 453$  м/с).

2. Чему равна средняя энергия поступательного движения молекул азота, если 2 кг его в сосуде объемом  $2 \text{ м}^3$  оказывают давление  $1,5 \times 10^5$  Па? (Ответ:  $10,5 \times 10^{-21}$  Дж).

3. При повышении температуры идеального газа на  $\Delta T_1 = 150$  К средняя скорость движения его молекул увеличилась с  $v_1 = 400$  м/с до  $v_2 = 500$  м/с. На сколько еще нужно нагреть этот газ, чтобы увеличить среднюю скорость его молекул до  $v_3 = 600$  м/с? (Ответ:  $\cong 183$  К).

4. В баллоне вместимостью  $V = 2,53$  л содержится углекислый газ при температуре  $T = 400$  К и давлении  $P = 1,3$  Па. Сколько столкновений  $Z$  происходит между молекулами за 1 секунду? Молярная масса углекислого газа  $\mu = 4,4 \cdot 10^{-2}$  кг/моль. Эффективный диаметр молекул углекислого газа  $d = 4,65 \cdot 10^{-10}$  м. (Ответ:  $3,0 \cdot 10^{22}$ ).

5. Найти среднее число столкновений в 1 секунду молекул углекислого газа при температуре  $t = 100$  °С, если длина свободного пробега при этих условиях равна  $8,7 \times 10^2$  см. (Ответ:  $4,9 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ ).

6. В сосуде, объем которого 1 л, содержится 5 г идеального газа под давлением  $0,5 \cdot 10^5$  Па. Определите среднюю квадратичную скорость молекул газа. (Ответ: 173 м/с).

7. Кислород находится при температуре 47 °С. Определить: а) кинетическую энергию одной молекулы; б) среднюю квадратичную скорость молекул. (Ответ:  $1,1 \cdot 10^{-20}$  Дж ; 500 м/с).

8. Средняя квадратичная скорость некоторого газа при нормальных условиях равна 480 м/с. Сколько молекул содержит 1 г этого газа? (Ответ:  $2,04 \cdot 10^{22}$ ).

9. Определить давление, оказываемое газом на стенки сосуда, если его плотность равна  $0,01 \text{ кг/м}^3$ , а средняя квадратичная скорость молекул газа составляет  $480 \text{ м/с}$ . (Ответ:  $768 \text{ Па}$ ).

10. Во сколько раз наиболее вероятная скорость пылинки, взвешенной в воздухе дымогенератора, меньше наиболее вероятной скорости молекул воздуха? Масса пылинки  $10 \text{ мкг}$ . Воздух считать однородным газом, масса одного киломоля которого равна  $29 \text{ г/моль}$ . (Ответ:  $4,56 \cdot 10^8$ ).

11. Найти отношение числа молекул азота, находящихся при нормальных условиях, модули скорости которых лежат в интервале 1) от  $99 \text{ м/с}$  до  $101 \text{ м/с}$ ; 2) от  $499 \text{ м/с}$  до  $501 \text{ м/с}$ . Молярная масса азота  $28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ . (Ответ:  $0,176$ ).

12. Найти среднюю арифметическую, среднюю квадратичную и наиболее вероятную скорости молекул идеального газа, у которого при давлении  $300 \text{ мм рт.ст}$  плотность  $0,3 \text{ кг/м}^3$ . (Ответ:  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8p}{\pi\rho}} = 579 \text{ м/с}$ ;

$$v_{\text{ср кв}} = \sqrt{\frac{3z}{\rho}} = 628 \text{ м/с}; \quad v_e = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} = 513 \text{ м/с}.$$

13. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул азота больше их наиболее вероятной скорости на  $\Delta v = 50 \text{ м/с}$ ? Молярная масса азота  $28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ . (Ответ:  $T = \frac{\Delta v^2 \mu}{R(\sqrt{3} - \sqrt{2})^2} = 83 \text{ К}$ ).

14. Определить среднюю квадратичную скорость молекулы газа, находящегося в сосуде объемом  $2 \text{ л}$  под давлением  $200 \text{ кПа}$ . Масса газа  $0,3 \text{ г}$ . (Ответ:  $2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ).

15. При изохорном нагревании давление водорода увеличилось в  $1,44$  раза. Как и во сколько раз увеличилась средняя квадратичная скорость молекул водорода? (Ответ:  $V_2 = 1,2 V_1$ ).

16. Найти среднюю длину свободного пробега атомов гелия в условиях, когда плотность гелия  $2,1 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$ . (Ответ:  $1,8 \text{ мкм}$ ).

17. Колба емкостью  $4 \text{ л}$  содержит  $0,6 \text{ г}$  водорода под давлением  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Определить среднюю квадратичную скорость молекул газа. (Ответ:  $2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ).

18. В сосуде находится углекислый газ, плотность которого  $1,7 \text{ кг/м}^3$ ; средняя длина свободного пробега его молекул при этих условиях равна  $\lambda_{\text{ср}} = 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ . Найти диаметр молекул углекислого газа. (Ответ:  $0,35 \text{ нм}$ ).

19. Найти относительное число молекул углекислого газа  $CO_2$ , которые при температуре  $T = 300$  К имеют кинетические энергии поступательного движения выше, чем  $E_0 = 20 \cdot 10^8$  Дж. (Ответ:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t_1} \cdot \exp(-t_1) = 2,36 \cdot 10^{-8}, \text{ где } t_1 = \frac{E_0}{kT}.$$

20. Определить температуру водорода, при которой средняя квадратичная скорость молекул больше их наиболее вероятной скорости на  $\Delta v = 400$  м/с. Найти среднюю арифметическую скорость молекул водорода при этой температуре. Молярная масса водорода  $2 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. (Ответ:

$$T = \frac{\Delta v^2 \cdot \mu}{R \cdot (\sqrt{3} - \sqrt{2})^2} = 381 \text{ К}; \langle v \rangle = 2 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

### Вопросы для самопроверки к разделу 1

1. Какой газ называется идеальным?
2. Какие уравнения состояния для идеального газа вы запомнили?
3. Запишите и поясните условия, определяющие состояния идеального газа.
4. Сравните температуру по шкале Кельвина и по шкале Цельсия.
5. Каковы средняя и средняя квадратичная скорости молекул газа?
6. Назовите основные положения молекулярно-кинетической теории вещества.
7. Как взаимодействуют между собой молекулы идеального газа?
8. Какова суть парциального давления? Сформулируйте закон Дальтона.
9. Приведите основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.
10. Почему температура – макроскопическая характеристика состояния вещества?
11. Что лежит в основе измерения температур?
12. Перечислите опытные факты, подтверждающие справедливость трех основных положений молекулярно-кинетической теории строения вещества.
13. Каков молекулярный механизм давления идеального газа на стенки сосуда? Как зависит давление газа от энергии молекул?
14. Каков физический смысл молярной газовой постоянной?
15. От каких величин и как зависит средняя длина свободного пробега?
16. Как понимать термин «столкновения» молекул? От каких параметров зависит среднее число столкновений молекул в единице объема газа в одну секунду?

17. Какое состояние системы называют равновесным? Почему изолированная система стремится к равновесному состоянию?

18. Охарактеризуйте различие между внутренними и внешними параметрами.

19. Какими параметрами определяется равновесное состояние идеального газа? Можно ли определить экспериментально, является ли данное состояние равновесным?

20. Откуда следует, что в состоянии равновесия все части системы имеют одну и ту же температуру?

## 2. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

### 2.1. Термодинамическая система. Термодинамические параметры. Термодинамический процесс

*Термодинамика* – это раздел физики, изучающий наиболее общие тепловые свойства макросистем, находящихся в термодинамическом равновесии, и процессы перехода между такими состояниями. Термодинамика не связывает эти свойства и процессы со строением и внутренней структурой систем, а устанавливает их наиболее общие закономерности, используя при этом обобщенные понятия, пригодные для любой макросистемы.

В термодинамике рассматривается *термодинамическая система* – совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией между собой и с внешней средой.

Для описания состояния термодинамической системы вводятся физические величины, которые называются *термодинамическими параметрами*. Обычно ими выбирают давление, удельный объем и температура.

Давление  $p$  определяется нормальной силой, действующей со стороны

газа на единицу площади:  $p = \frac{F}{S}$ .

Удельным объемом  $v$  называется величина, обратная плотности  $\rho$  тела:  $v = \frac{1}{\rho}$ . Для однородного тела удельный объем равен объему тела, масса которого равна единице.

Температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Температура равновесной системы является мерой интенсивности теплового движения ее молекул. В *международной практической шкале* температура измеря-

ется в градусах Цельсия  $^{\circ}\text{C}$  и обозначается  $t$ . В этой шкале две реперные точки: температура замерзания и кипения воды  $0^{\circ}\text{C}$  и  $100^{\circ}\text{C}$  при  $p = 1,013 \cdot 10^5$  Па. В *термодинамической шкале* температур температура измеряется в кельвинах (К) и обозначается  $T$ . В этой шкале реперная точка одна – тройная точка воды, когда лед, вода и насыщенный пар при  $p = 609$  Па находятся в термодинамическом равновесии при  $T = 273,16$  К.

Связь между термодинамической (абсолютной) температурой  $T$  и температурой по международной практической шкале  $t$ :  $T = 273,15 + t$ .

Любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее термодинамических параметров, называется *термодинамическим процессом*. Макроскопическая система находится в *термодинамическом равновесии*, если ее состояние с течением времени не меняется при неизменных внешних условиях.

## 2.2. Внутренняя энергия. Две формы передачи энергии.

### Работа в термодинамике. Количество теплоты. Теплоемкость

*Внутренней энергией* тела или термодинамической системы называется энергия, зависящая только от термодинамического состояния этого тела (системы).

Рассмотрим идеальный газ. В таком газе молекулы не взаимодействуют между собой, и их потенциальная энергия считается равной нулю. Поэтому *внутренняя энергия идеального газа  $U$  представляет собой полную кинетическую энергию его хаотически движущихся молекул*. Поскольку идеальный газ состоит из большого числа молекул эта величина может быть найдена путем умножения средней кинетической энергии одной молекулы  $E$  на их полное число  $N$ .

Если масса газа равна  $m$ , то  $N = \frac{m}{M} N_A$ ,

где  $M$  – его молярная масса. Поскольку, как мы знаем,  $E = \frac{i}{2} kT$ , где

$i$  – число степеней свободы молекулы, получаем:

$$U = \frac{i}{2} kT \frac{m}{M} N_A = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT,$$

где учтено, что  $kN_A = R$ . Из (2.1) следует, что *внутренняя энергия единицы массы идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре и не зависит от других макроскопических параметров газа*.

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

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

**Работа** – это процесс передачи энергии от одной системы к другой. Существует еще одна форма передачи энергии – **теплообмен** или **теплопередача**. Количественной характеристикой этого процесса является теплота, переданная от одного тела к другому. В процессе работы могут происходить любые превращения энергии, в том числе механической энергии во внутреннюю (при сжатии газа) и внутренней в механическую (при расширении газа). Теплообмен – специфическая форма передачи внутренней энергии и только от нагретого тела к холодному. Этот процесс всегда является необратимым.

Одна из важнейших физических характеристик газов – **теплоемкость**. Различают удельную и молярную теплоемкости.

**Удельная теплоемкость** газа – величина, равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К

$$c = \frac{Q}{m \Delta T}.$$

**Молярная теплоемкость** газа – величина, равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить одному молю газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К

$$C = \frac{Q}{\nu \Delta T}.$$

Молярная и удельная теплоемкости связаны между собой формулой

$$C = M c,$$

где  $M$  – молярная масса газа.

Удельная и молярная теплоемкости газа зависят от условий, в которых происходит нагревание, то есть от характера термодинамического процесса. Различают теплоемкости при постоянном объеме  $c_V$  и постоянном давлении  $c_p$ .

Молярная теплоемкость при постоянном объеме

$$C_V = \frac{dU}{dT}.$$

Молярная теплоемкость при постоянном давлении

$$C_p = \frac{dU}{dT} + R.$$

Уравнение Майера связывает молярные теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме

$$C_p = C_v + R,$$

где  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – молярная газовая постоянная.

Молярные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно равны

$$C_v = \frac{i}{2} R \quad \text{и} \quad C_p = \frac{i+2}{2} R,$$

где  $i$  – число степеней свободы.

Удельные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно равны

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M} \quad \text{и} \quad c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}.$$

Отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме называется показателем адиабаты

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

### 2.3. Первое начало термодинамики.

#### Применение первого начала термодинамики к изопроцессам. Адиабатический процесс

Первое начало термодинамики говорит о том, что *теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы против внешних сил:*

$$Q = \Delta U + A.$$

Применим первое начало термодинамики к *изопроцессам*, то есть таким процессам, в которых один из термодинамических параметров системы сохраняется неизменным.

*Изохорный процесс* протекает при постоянном объеме ( $V = const$ ). На рис. 2.1 изображен график этого процесса – *изохора* – в координатах  $p, V$ , где процесс 1...2 – *изохорное нагревание*, процесс 1...3 – *изохорное охлаждение*. При *изохорном* процессе газ не совершает работу, поэтому первое начало термодинамики имеет вид:

$$Q = \Delta U,$$

то есть вся теплота, сообщаемая газу, идет на увеличение его внутренней энергии.

Для произвольной массы газа

$$Q = \Delta U = \frac{m}{M} C_V \Delta T.$$

*Изобарный процесс* протекает при постоянном давлении ( $p = const$ ). На рис. 2.2 изображен график этого процесса – изобара – в координатах  $p, V$ , где работа газа при увеличении объема определяется площадью заштрихованного прямоугольника.

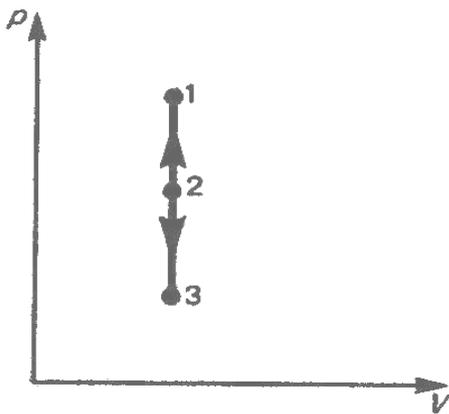


Рис. 2.1. График изохорного процесса

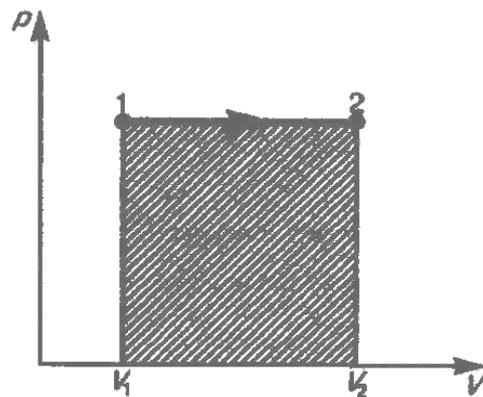


Рис. 2.2. График изобарного процесса

Работа изобарного расширения газа определяется формулой

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

В изобарном процессе при сообщении газу массой  $m$  количества теплоты

$$\Delta Q = \frac{m}{M} C_p \Delta T$$

его внутренняя энергия возрастает на величину

$$\Delta U = \frac{m}{M} C_V \Delta T.$$

Первое начало термодинамики имеет вид:

$$Q = \Delta U + A.$$

*Изотермический процесс* протекает при постоянной температуре ( $T = const$ ). График этого процесса – изотерма – изображен в координа-

тах  $p$ ,  $V$  на рис. 2.3. Изотерма представляет собой гиперболу, расположена на диаграмме тем выше, чем выше температура, при которой происходит процесс.

Так как при постоянной температуре внутренняя энергия идеального газа не изменяется, то изменение внутренней энергии  $\Delta U = 0$ , и первое начало термодинамики принимает вид

$$Q = A,$$

то есть все количество теплоты, сообщаемое газу, расходуется на совершение им работы против внешних сил:

$$Q = A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

*Адиабатический процесс* протекает без теплообмена между системой и внешней средой ( $Q = 0$ ). Первое начало термодинамики имеет вид

$$A = -\Delta U,$$

то есть внешняя работа совершается за счет внутренней энергии системы. График адиабатического процесса – адиабата --- изображен в координатах  $p$ ,  $V$  на рис. 2.3. Адиабата представляет собой гиперболу, которая более крута, чем изотерма, так как при адиабатическом сжатии 1...3 увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, как при изотермическом сжатии, но и повышением температуры.

Работа газа в адиабатическом процессе

$$A = -\frac{m}{M} C_V \Delta T = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2).$$

Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона) имеет вид:

$$pV^\gamma = const,$$

$$TV^{\gamma-1} = const,$$

$$T^\gamma p^{1-\gamma} = const,$$

где безразмерная величина  $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{c_p}{c_V} = \frac{i+2}{i}$  – показатель адиабаты.

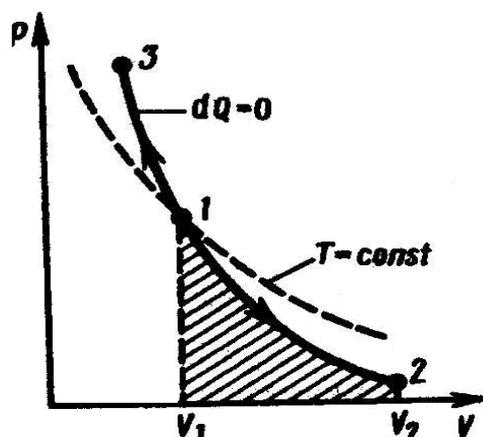


Рис. 2.3. Графики изотермического и адиабатического процессов

## 2.4. Тепловые двигатели. Второе начало термодинамики.

### Кпд теплового двигателя. Цикл Карно

Первое начало термодинамики допускает возможность преобразования подведенной к системе теплоты в работу, совершаемую этой системой над внешними телами. Устройство, преобразующее тепло в механическую работу, называется **тепловым двигателем**.

*Второе начало термодинамики* говорит о том, что *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу*.

В любом реально действующем тепловом двигателе только часть полученной от внешних тел теплоты может преобразоваться в работу, остальная же теплота должна передаваться другим телам.

Тепловой двигатель является циклически работающей системой, в которой по завершении каждого цикла выполняется условие

$$Q_1 = A + Q_2,$$

где  $Q_1$  – теплота, получаемая от нагревателя,  $Q_2$  – теплота, отданная холодильнику,  $A$  – полезная работа, совершаемая тепловой машиной.

**Цикл, или круговой процесс** – это такой процесс, при котором система, пройдя ряд состояний, возвращается в исходное. Цикл называется *прямым*, если в результате него совершается положительная работа, и *обратным*, если эта работа отрицательна.

Любой двигатель должен совершать как можно большую полезную работу  $A$  при одном и том же количестве затраченной теплоты  $Q_1$ . Поэтому нужно стремиться предельно уменьшить безвозвратно теряемую двигателем теплоту  $Q_2$ .

Для характеристики эффективности двигателей вводят *коэффициент полезного действия (кпд)*, который как раз и определяется *отношением полезной работы  $A$  к затраченной теплоте  $Q_1$* :

$$\eta = \frac{A}{Q_1}.$$

Кпд теплового двигателя обычно представляют в виде

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

**Циклом Карно** называется круговой процесс, состоящий из четырех последовательных процессов: изотермического расширения ( $1-1'$ ) при темпе-

ратуре  $T_1$ , адиабатического расширения ( $1'-2$ ), изотермического сжатия ( $2-2'$ ) при температуре  $T_2$  и адиабатического сжатия ( $2'-1$ ) (рис. 2.4). Прямой цикл Карно лежит в основе работы тепловых машин, обратный – в основе работы холодильных машин.

Коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры нагревателя и холодильника соответственно.

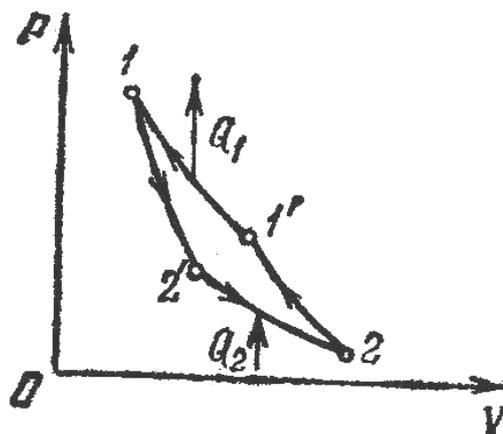


Рис. 2.4. Прямой цикл Карно

## 2.5. Обратимые и необратимые процессы

Процесс называется обратимым, если при прохождении его системой сначала в прямом, а потом в обратном направлении она возвращается в первоначальное состояние и при этом в первоначальное состояние возвращаются все взаимодействовавшие с ней тела.

Необратимые процессы в одном направлении протекают самопроизвольно, а в обратном направлении они могут быть осуществлены только в результате работы внешних сил.

Второе начало термодинамики определяет направление процесса. Оно указывает на необратимость процесса одной формы передачи энергии (работа) в другую (теплота). Работа – форма передачи энергии упорядоченного движения тела как целого, теплота – форма передачи энергии неупорядоченного хаотического движения. Упорядоченное движение может переходить в упорядоченное самопроизвольно. Обратный процесс возможен лишь при условии совершения работы внешними силами.

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Газ, занимающий объем 20 л при нормальных условиях, был изобарно нагрет до  $80^\circ\text{C}$ . Определить работу расширения газа.

Дано:  $V = 20 \text{ л} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ;  $T_1 = 273 \text{ К}$ ;  $T_2 = (273 + 80) \text{ К} = 353 \text{ К}$ ,  
 $p_1 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $A = ?$

Решение

Работа расширения газа при изобарном процессе определяется формулой

$$A = p\Delta V.$$

Из уравнения состояния идеального газа  $pV = \frac{m}{M}RT$  следует, что работа

$$A = \frac{m}{M}R\Delta T.$$

Записав уравнение состояния идеального газа для начального момента

$$p_1V_1 = \frac{m}{M}RT_1,$$

найдем число молей газа:

$$\frac{m}{M} = \frac{p_1V_1}{RT_1},$$

откуда

$$A = \frac{p_1V_1\Delta T}{T_1}.$$

Подставив численные значения заданных величин, получим

$$A = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot 80 \text{ К}}{273 \text{ К}} = 590 \text{ Дж}.$$

Ответ: Работа расширения газа  $A = 590$  Дж.

**Пример 2.** Вычислить удельную теплоемкость  $c_V$  смеси неона и водорода. Массовые доли газов соответственно равны  $\omega_1 = 0,8$  и  $\omega_2 = 0,2$ . Для неона удельная теплоемкость при постоянном объеме  $c_{V_1} = 624$  Дж/(кг·К), для водорода удельная теплоемкость при постоянном объеме  $c_{V_2} = 10,4$  кДж/(кг·К).

*Дано:* газ неон, газ водород, массовая доля неона  $\omega_1 = 0,8$ ; массовая доля водорода  $\omega_2 = 0,2$ ;  $c_{V_1} = 624$  Дж/(кг·К);  $c_{V_2} = 10,4$  кДж/(кг·К).

Найти: удельную теплоемкость  $c_V$  смеси.

*Решение*

Удельную теплоемкость смеси при постоянном объеме найдем из следующих рассуждений. Теплоту, необходимую для нагревания смеси на  $\Delta T$ , выразим двумя соотношениями:

$$Q = c_V(m_1 + m_2)\Delta T, \quad (1)$$

где  $c_V$  – удельная теплоемкость смеси;  $m_1$  – масса неона;  $m_2$  – масса водорода, и

$$Q = (c_{V_1} m_1 + c_{V_2} m_2) \Delta T, \quad (2)$$

где  $c_{V_1}$  и  $c_{V_2}$  – удельные теплоемкости неона и водорода соответственно.

Приравняв правые части уравнений (1) и (2) и разделив обе части полученного равенства на  $\Delta T$ , получим

$$c_V (m_1 + m_2) = (c_{V_1} m_1 + c_{V_2} m_2),$$

откуда

$$c_V = c_{V_1} \frac{m_1}{m_1 + m_2} + c_{V_2} \frac{m_2}{m_1 + m_2}.$$

Отношения  $\omega_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$  и  $\omega_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$  выражают массовые доли соответственно неона и водорода. С учетом этих обозначений последняя формула примет вид:

$$c_V = c_{V_1} \omega_1 + c_{V_2} \omega_2.$$

Подставив в эту формулу числовые значения величин, найдем  $c_V = 2,58$  кДж/(кг·К).

Ответ:  $c_V = 2,58$  кДж/(кг·К).

### Задачи для самостоятельного решения

1. Углекислый газ, нагреваясь от 15 до 35 °С, расширяется при постоянном давлении. Определить работу расширения, если масса газа 2 кг. (Ответ:  $A = 7,56$  кДж).

2. До какой температуры был изобарически нагрет кислород, взятый при 0 °С, если при его расширении совершена работа 5 кДж? Масса газа 1 кг. (Ответ:  $t = 19,3$  °С).

3. При изотермическом расширении 25 г водорода его объем увеличился в 5 раз. Вычислить работу расширения, если температура водорода была 27 °С. (Ответ:  $A = 5$  кДж).

4. 8 л кислорода находились при нормальных условиях. При изотермическом расширении объем кислорода увеличился до 12 л. Вычислить работу расширения. (Ответ:  $A = 330$  Дж).

5. Один моль газа, изотермически расширяясь при температуре 27 °С, совершил работу 2500 Дж. Во сколько раз увеличился объем газа? (Ответ: в 2,73 раза).

6. При адиабатном сжатии азота его давление возросло в 10 раз. Во сколько раз изменился его объем? (Ответ: в 5,19 раза).

7. Некоторая масса углекислого газа, взятого при  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении  $9,8 \cdot 10^4\text{ Па}$ , адиабатно сжата до давления  $9,8 \cdot 10^5\text{ Па}$ . Какова его температура после сжатия? (Ответ:  $t = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

8. Найти изменение внутренней энергии  $1\text{ кг}$  кислорода при его охлаждении от  $629\text{ К}$  до  $49\text{ К}$ . (Ответ:  $\Delta U = 3,8 \cdot 10^5\text{ Дж}$ ).

9. При какой температуре внутренняя энергия  $1,5\text{ кг}$  озона ( $O^3$ ) будет равна  $2,33 \cdot 10^2\text{ кДж}$ ? (Ответ: при  $T = 300\text{ К}$ ).

10. Найти отношение удельных теплоемкостей  $c_p$  и  $c_v$  для водорода.

(Ответ:  $\frac{c_p}{c_v} = 1,4$ ).

11. Найти удельную теплоемкость  $c_p$  газовой смеси, состоящей из  $3000$  молей аргона и  $2000$  молей азота. (Ответ:  $c_p = 685\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ).

12. Определить удельные теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  смеси углекислого газа массой  $3\text{ г}$  и азота массой  $4\text{ г}$ . (Ответ:  $c_p = 917\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $c_v = 667\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ).

13. Определить удельные теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  некоторого двухатомного газа, если плотность этого газа при нормальных условиях  $1,43\text{ кг}/\text{м}^3$ . (Ответ:  $c_p = 910\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $c_v = 850\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ).

14. В закрытом сосуде находится смесь, состоящая из  $20\text{ г}$  азота и  $32\text{ г}$  кислорода. Найти изменение внутренней энергии смеси газов при охлаждении ее на  $28\text{ К}$ . (Ответ:  $\Delta U = 1,66\text{ кДж}$ ).

15. Разность удельных теплоемкостей  $c_p - c_v$  некоторого двухатомного газа равна  $260\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . Найти молярную массу  $M$  газа и его удельные теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$ . (Ответ:  $M = 0,032\text{ кг}/\text{моль}$ ,  $c_v = 650\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $c_p = 910\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ).

16. В баллоне находятся азот и аргон. Определить удельную теплоемкость  $c_v$  смеси этих газов, если массовые доли азота и аргона одинаковы и равны  $0,5$ . (Ответ:  $c_v = 526\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ).

17. Отношение удельных теплоемкостей  $\frac{c_p}{c_v}$  некоторого газа равно  $1,4$ .

Определить молярные теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  этого газа. (Ответ:  $C_p = 29\text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ,  $C_v = 20,77\text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ).

18. Смесь двух газов состоит из гелия массой 5 г и водорода массой 2 г. Найти отношение теплоемкостей  $\frac{c_p}{c_v}$  этой смеси. (Ответ:  $\frac{c_p}{c_v} = 1,51$ ).

19. Определить удельную теплоемкость  $c_V$  смеси газов, содержащей 10 г кислорода и 20 г азота. (Ответ:  $c_V = 710$  Дж/(кг·К)).

20. Вычислить удельные теплоемкости  $c_V$  и  $c_p$  гелия. (Ответ:  $c_V = 3,12$  кДж/(кг·К),  $c_p = 5,19$  кДж/(кг·К)).

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Азот массой 200 г нагревают при постоянном давлении от температуры  $20^\circ\text{C}$  до температуры  $200^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты поглощается при этом? Каков прирост внутренней энергии газа? Какая работа совершается газом?

Дано:  $m = 200$  г = 0,2 кг;  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  ( $T_1 = 293$  К);  $t_2 = 200^\circ\text{C}$  ( $T_2 = 473$  К).  
Найти:  $Q$ ,  $\Delta U$ ,  $A$ .

*Решение*

Согласно первому началу термодинамики теплота  $Q$ , подводимая к газу, расходуется на увеличение  $\Delta U$  его внутренней энергии и на совершение газом работы  $A$ :

$$Q = \Delta U + A. \quad (1)$$

Работа газа при постоянном давлении  $p$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1),$$

где  $V_1$  – начальный объем,  $V_2$  – конечный объем.

Воспользуемся уравнением Менделеева–Клапейрона:

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

где  $M = 0,028$  кг/моль – молярная масса азота.

Тогда

$$A = pV_2 - pV_1 = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1). \quad (2)$$

Внутренняя энергия газа  $U = \frac{i}{2} \frac{m}{M}RT$ , где  $i$  – число степеней свободы молекулы (для двухатомных молекул азота  $i = 5$ ). Тогда прирост внутренней энергии при изменении температуры от  $T_1$  до  $T_2$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R T_2 - \frac{i}{2} \frac{m}{M} R T_1 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1). \quad (3)$$

Подставляем (2) и (3) в (1), находим количество теплоты  $Q$ :

$$Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1) + \frac{m}{M} R (T_2 - T_1) = \frac{i+2}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1).$$

Проверка размерности:

$$[A] = [\Delta U] = [Q] = \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К} = \text{Дж}.$$

Подставим данные:

$$Q = \frac{5+2}{2} \cdot \frac{0,200}{0,028} \cdot 8,31(473 - 293) = 37,4 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 37,4 \text{ кДж}.$$

$$\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{0,200}{0,028} \cdot 8,31(473 - 293) = 10,7 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 10,7 \text{ кДж}.$$

$$A = \frac{0,200}{0,028} \cdot 8,31(473 - 293) = 10,7 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 10,7 \text{ кДж}.$$

Ответ:  $Q = 37,4 \text{ кДж}$ ;  $\Delta U = 10,7 \text{ кДж}$ ;  $A = 10,7 \text{ кДж}$ .

**Пример 2.** Температура нагревателя идеальной тепловой машины 500 К, температура холодильника 400 К. Определить КПД цикла Карно и полезную мощность машины, если нагреватель передает ей 1675 Дж теплоты в секунду.

*Дано:* температура нагревателя  $T_1 = 500 \text{ К}$ , температура холодильника  $T_2 = 400 \text{ К}$ , теплота  $Q = 1675 \text{ Дж}$ , переданная за время  $t = 1 \text{ с}$ .

Найти: КПД цикла Карно  $\eta$  и полезную мощность  $N$ .

*Решение*

КПД машины определяется по формуле

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{500 - 400}{500} = 0,2.$$

В полезную работу превращаются

$$A = \eta Q = 0,2 \cdot 1675 = 335 \text{ Дж}.$$

Полезная мощность машины

$$N = \frac{A}{t} = \frac{335}{1} = 335 \text{ Вт.}$$

Ответ: кпд цикла Карно  $\eta = 0,2$ ; полезная мощность машины  $N = 335$  Вт.

**Пример 3.** Тепловая машина работает по циклу Карно, кпд которого  $\eta = 0,25$ . Каков будет холодильный коэффициент  $\eta'$  машины, если она будет совершать тот же цикл в обратном направлении? Холодильным коэффициентом называется отношение количества теплоты, отнятого от охлаждаемого тела, к работе двигателя, приводящего в движение машину.

*Дано:* кпд тепловой машины  $\eta = 0,25$ . Найти: холодильный коэффициент  $\eta'$  машины.

*Решение*

Кпд любого цикла, в том числе и цикла Карно, выражается формулой

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (1)$$

Особенность цикла Карно – его обратимость: процесс может протекать как в прямом, так и в обратном направлении (рис. 2.5). При обратном цикле Карно рабочее вещество будет, расширяясь по изотерме  $T_2 - T_2$ , отбирать от холодильника количество теплоты  $Q_2$  и, сжимаясь по изотерме  $T_1 - T_1$ , отдавать нагревателю количество теплоты  $Q_1$ . При этом, работа, совершенная рабочим веществом за один цикл, будет отрицательной (положительная работа расширения меньше по модулю отрицательной работы сжатия). В этом случае положительной будет работа  $A$  двигателя, приводящего в действие машину.

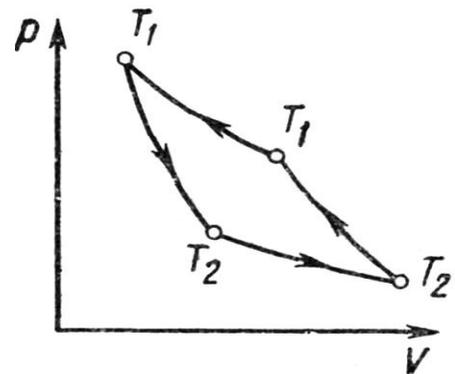


Рис. 2.5. Обратный цикл Карно

Согласно определению холодильного коэффициента запишем

$$\eta' = \frac{Q_2}{A}.$$

Чтобы определить  $\eta'$ , исключим из (1) величину  $Q_1$ , равную  $A + Q_2$ :

$$\eta = \frac{A}{A + Q_2}.$$

Выполнив преобразования, получим:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{A + Q_2}{A} = 1 + \frac{Q_2}{A} = 1 + \eta';$$

$$\eta' = \frac{1}{\eta} - 1 = \frac{1}{0,25} - 1 = 3, \text{ или } \eta' = 300 \text{ \%}.$$

Ответ: Холодильный коэффициент машины  $\eta' = 3$  или 300 %.

### Задачи для самостоятельного решения

1. При изохорном нагревании кислорода объемом 50 л давление газа изменилось на 0,5 МПа. Найти количество теплоты, сообщенное газу. (Ответ:  $Q = 62,5$  Дж).

2. Азот массой 200 г расширяется изотермически при температуре 280 К, причем объем газа увеличивается в два раза. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную при расширении газа работу и количество теплоты, полученное газом. (Ответ:  $\Delta U = 0$ ;  $A = 11,6$  кДж;  $Q = 11,6$  кДж).

3. Азот, занимающий объем 10 л под давлением 0,2 МПа, изотермически расширился до объема 28 л. Определить работу расширения газа и количество теплоты, полученное газом. (Ответ:  $A = 2,06$  кДж;  $Q = 2,06$  кДж).

4. При изотермическом расширении кислорода, содержавшего количество вещества 1 моль и имевшего температуру 300 К, газу было передано количество теплоты 2 кДж. Во сколько раз увеличился объем газа? (Ответ: объем увеличился в 2,23 раза).

5. В теплоизолированном цилиндре с поршнем находится азот массой 0,2 кг при температуре 20 °С. Азот, расширяясь, совершает работу 4,47 кДж. Найти изменение внутренней энергии азота и его температуру после расширения. Удельная теплоемкость азота при постоянном объеме  $c_V = 745$  Дж/(кг·К). (Ответ:  $\Delta U = 4,47$  кДж;  $\Delta T = 263$  К).

6. Водород массой 20 г был нагрет на 100 К при постоянном давлении. Определить количество теплоты, переданное газу; приращение внутренней энергии газа и работу расширения. (Ответ:  $Q = 29,3$  кДж;  $\Delta U = 20,9$  кДж;  $A = 8,4$  кДж).

7. Воздух массой 1,43 кг занимает при 0 °С объем 0,5 м<sup>3</sup>. Воздуху сообщили некоторое количество теплоты, и он изобарически расширился до объема 0,55 м<sup>3</sup>. Найти совершенную работу, количество поглощенной теплоты, изменение температуры и внутренней энергии воздуха. (Ответ:  $A = 11$  кДж;  $Q = 39$  кДж;  $\Delta T = 27$  К;  $\Delta U = 28$  кДж).

8. Водород при нормальных условиях имел объем  $100 \text{ м}^3$ . Найти изменение внутренней энергии газа при его адиабатном расширении до объема  $150 \text{ м}^3$ . (Ответ:  $\Delta U = -3,8 \text{ МДж}$ ).

9. Определить работу идеальной тепловой машины за один цикл, если в течение цикла машина получает от нагревателя  $2095 \text{ Дж}$  теплоты. Температура нагревателя  $400 \text{ К}$ , температура холодильника  $300 \text{ К}$ . (Ответ:  $A = 512,5 \text{ Дж}$ ).

10. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя  $T_1 = 500 \text{ К}$ , холодильника  $T_2 = 300$ . Работа изотермического расширения газа составляет  $2 \text{ кДж}$ . Определить термический КПД цикла; количество теплоты, отданное газом при изотермическом сжатии холодильнику. (Ответ:  $\eta = 40 \%$ ;  $Q_2 = 1,2 \text{ кДж}$ ).

11. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя  $T_1$  в три раза больше температуры охладителя  $T_2$ . Нагреватель передал газу количество теплоты  $Q_1 = 42 \text{ кДж}$ . Какую работу совершил газ? (Ответ:  $A = 28 \text{ Дж}$ ).

12. Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , холодильника  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Чему равен КПД машины? (Ответ:  $\eta = 40 \%$ ).

13. Идеальный газ совершает цикл Карно. Газ получил от нагревателя количество теплоты  $5,5 \text{ кДж}$  и совершил работу  $1,1 \text{ кДж}$ . Определить термический КПД цикла; отношение температур нагревателя и холодильника. (Ответ:  $\eta = 20 \%$ ;  $\frac{T_1}{T_2} = 1,25$ ).

14. Идеальный газ, совершающий цикл Карно,  $75 \%$  количества теплоты, полученной от нагревателя, отдает холодильнику. Количество теплоты, получаемой от нагревателя, равно  $10 \text{ кДж}$ . Определить термический КПД цикла; работу, совершенную при полном цикле. (Ответ:  $\eta = 25 \%$ ;  $A = 2,5 \text{ кДж}$ ).

15. При круговом процессе, происходящем по циклу Карно, газ произвел работу  $8,6 \text{ кДж}$  и передал холодильнику  $10,45 \text{ кДж}$  теплоты. Определить КПД цикла. (Ответ:  $\eta = 45 \%$ ).

16. Тепловая машина, совершая обратимый цикл Карно, за один цикл совершает работу  $1 \text{ кДж}$ . Температура нагревателя  $400 \text{ К}$ , а холодильника  $300 \text{ К}$ . Определить КПД машины; количество теплоты, получаемое машиной от нагревателя за цикл; количество теплоты, отдаваемое холодильнику за цикл. (Ответ:  $\eta = 25 \%$ ;  $Q_1 = 4 \text{ кДж}$ ;  $Q_2 = 3 \text{ кДж}$ ).

17. Идеальный газ совершает цикл Карно, термический КПД которого равен  $0,4$ . Определить работу изотермического сжатия газа, если работа изотермического расширения равна  $400 \text{ Дж}$ . (Ответ:  $A_{34} = -240 \text{ Дж}$ ).

18. Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , холодильника  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему равен КПД машины? (Ответ:  $\eta = 40\%$ ).

19. Совершая цикл Карно, газ получил от нагревателя  $41,8\text{ кДж}$  теплоты и совершил работу  $15\text{ кДж}$ . Температура нагревателя  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вычислить температуру холодильника. (Ответ:  $t = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

20. Температура нагревателя тепловой машины, работающей по циклу Карно,  $207\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура холодильника  $117\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какой должна быть температура нагревателя (при неизменной температуре холодильника), чтобы КПД машины увеличился в 3 раза. (Ответ:  $T_1 = 891\text{ К}$ ).

## Вопросы для самопроверки к разделу 2

1. Что изучает термодинамика?
2. Что такое термодинамическая система?
3. Что такое термодинамический процесс?
4. Какие термодинамические параметры вы знаете?
5. Что такое термодинамическая шкала температур?
6. В чем разница между теплоемкостью тела, удельной и молярной теплоемкостями?
7. Что такое внутренняя энергия?
8. Чем отличается внутренняя энергия реального газа от внутренней энергии идеального газа?
9. Какие формы передачи энергии вам известны? Охарактеризуйте их.
10. Что такое изопроцесс?
11. Сформулируйте первое начало термодинамики.
12. Примените первое начало термодинамики ко всем известным вам изопроцессам в газах.
13. В каком из процессов, изохорном или изобарном, теплоемкость больше? Почему?
14. Дайте определение адиабатного процесса.
15. Изменяется ли температура газа при его адиабатическом расширении?
16. Построить графики зависимости давления от объема для изотермического, изобарного, изохорного и адиабатического процессов.
17. В чем состоит второе начало термодинамики? Чем оно дополняет первое начало термодинамики?
18. От чего зависит КПД тепловой машины?
19. Что представляет собой цикл Карно?
20. В чем различие между обратимыми и необратимыми процессами? Почему все реальные процессы необратимы?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сборник задач и вопросов по физике для средних специальных учебных заведений : учеб. пособие / Р.А. Гладкова, В.Е. Добронравов, Л.С. Жданов, Ф.С. Цодиков ; под ред. Р.А. Гладковой. – М. : Наука, 1988. – 384 с.
2. Дмитриева, В.Ф. Физика : учеб. пособие для техникумов / В.Ф. Дмитриева под ред. В.Л. Прокофьева. – 4-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2001. – 415 с.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 6-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 1999. – 542 с.
4. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука. – 1985. – 512 с.
5. Рымкевич, П.А. Курс физики : учеб. пособие для педагогических институтов / П.А. Рымкевич. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М. : Высш. шк., 1975. – 464 с.
6. Трофимова, Т.И. Сборник задач по курсу физики : учеб. пособие для студентов втузов / Т.И. Трофимова. – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 1996. – 303 с.
7. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – изд. 3-е, испр. и доп. – СПб. : Книжный мир, 2003. – 328 с.
8. Чертов, А.Г. Задачник по физике: учеб. пособие для втузов / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд. физ.-мат. лит., 2001. – 640 с.
9. Фирганг, Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики : учеб. пособие для втузов / Е.В. Фирганг. – М. : Высш. шк., 1977. – 351 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА .....	4
1.1. Молекулярно-кинетическая теория газов. Законы идеальных газов .....	4
1.2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов. Статистические закономерности. ....	13
2. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ .....	20
2.1. Термодинамическая система. Термодинамические параметры. Термодинамический процесс .....	20
2.2. Внутренняя энергия. Две формы передачи энергии. Работа в термодинамике. Количество теплоты. Теплоемкость.....	21
2.3. Первое начало термодинамики. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам. Адиабатический процесс .....	23
2.4. Тепловые двигатели. Второе начало термодинамики. Кпд теплового двигателя. Цикл Карно .....	26
2.5. Обратимые и необратимые процессы .....	27
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	37

Учебное издание

**Коростелева Ирина Александровна**  
**Куликова Генриетта Владимировна**

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

Методические указания к решению задач по физике

Редактор *Г.Ф. Иванова*  
Технический редактор *А.А. Курилко*

---

План 2014 г. Поз. 9.12. Подписано в печать 23.10.14.  
Уч.-изд. л. 2,5. Усл. печ. л. 2,2. Зак. 187. Тираж 80 экз. Цена 116 руб.

---

Издательство ДВГУПС  
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

---

---

Кафедра «Физика и теоретическая механика»

И.А. Коростелева, Г.В. Куликова

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА  
И ТЕРМОДИНАМИКА**

Методические указания

---

---

Хабаровск  
2014