

1.2 Основные газовые законы

Закон Бойля-Мариотта: если температура газа не изменяется ($T = \text{const}$), то давление газа и его удельный объем связаны следующей зависимостью:

$$P v = \text{const} . \quad (9)$$

Закон Гей-Люссака: если давление газа остается постоянным ($P = \text{const}$), то соотношение между удельным объемом газа и его абсолютной температурой представляет:

$$\frac{v}{T} = \text{const} \quad (10)$$

или

$$\rho T = \text{const} . \quad (11)$$

Для газов, взятых при одинаковых температурах и давлениях, имеет место следующая зависимость, полученная на основе **закона Авогадро**:

$$\frac{\mu}{\rho} = \text{const} , \quad (12)$$

где μ — молекулярная масса газа, кг/кмоль.

Для нормальных условий объем 1 кмоль всех идеальных газов равен 22,4136 м³/кмоль (округленно 22,4 м³/кмоль).

Плотность газа при нормальных условиях определяется из равенства

$$\rho_n = \frac{\mu}{22,4} . \quad (13)$$

Пользуясь этой формулой, можно определить удельный объем любого газа при нормальных условиях:

$$v_H = \frac{22,4}{\mu}. \quad (14)$$

Характеристическое **уравнение идеального газа** или уравнение состояния связывает между собой основные параметры состояния — давление, объем и температуру — и может быть представлено следующими уравнениями:

$$P V = m R T; \quad (15)$$

$$P v = R T; \quad (16)$$

$$P V_{\mu} = \mu R T; \quad (17)$$

В уравнениях (15) — (17) приняты следующие обозначения:

P — абсолютное давление газа, Па;

V — объем газа, м³;

m — масса газа, кг;

v — удельный объем газа, м³/кг;

V_{μ} — объем 1 кмоль газа, м³/кмоль;

R — газовая постоянная, Дж/(кг·К);

R_{μ} — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К),

Каждое из этих уравнений отличается от другого лишь тем, что относится к различным количествам газа: первое - к произвольной массе m кг; второе - к 1 кг, третье — к 1 кмолью газа.

Численное значение универсальной газовой постоянной легко получить из уравнения (17) при подстановке значений входящих в него величин при нормальных условиях:

$$\mu R = \frac{P V_{\mu}}{T} = \frac{101\,325 \cdot 22,4136}{273,15} = 8314 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Газовая постоянная определяется из уравнения

$$R = \frac{8314}{\mu}, \quad (18)$$

где μ - масса 1 кмоль газа в килограммах (численно равная молекулярной массе газа), кг/кмоль.

В приложении А приведены молекулярные массы, плотности и газовые постоянные важнейших для техники газов.

Пользуясь характеристическим уравнением для двух различных состояний какого либо газа, можно получить выражение для определения любого параметра при переходе от одного состояния к другому, если значения остальных параметров известны:

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2}; \quad (19)$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}. \quad (20)$$

Уравнение (20) часто применяют для «приведения объема к нормальным условиям», т. е. для определения объема, занимаемого газом, при $t = 0^\circ\text{C}$ и $P = 760$ мм рт. ст., если объем его при каких-либо значениях P и t известен. Для этого случая уравнение (20) обычно представляют в следующем виде:

$$\frac{P V}{T} = \frac{P_H V_H}{T_H}. \quad (21)$$

В правой части уравнения все величины взяты при нормальных условиях, в левой — при произвольных значениях давления и температуры.

Уравнение (19) можно написать и следующим образом:

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2}. \quad (22)$$

Уравнение (22) позволяет определить плотность газа при любых условиях, если значение его для определенных условий известно.

Примеры решения задач

6 Какой объем занимает 1 кг азота при температуре 70 °С и давлении 0,2 МПа.

Решение:

Из характеристического уравнения для 1 кг газа (16) имеем:

$$v = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{296,8 \cdot (273 + 70)}{0,2 \cdot 10^6} = 0,509 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

7 Во сколько раз объем определенной массы газа при -20 °С меньше, чем при +20 °С, если давление в обоих случаях одинаковое?

Решение:

При постоянном давлении объем газа изменяется по уравнению (10):

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{ следовательно, } \frac{V_2}{V_1} = \frac{273 + 20}{273 - 20} = 1,16.$$

8 Определить массу 5 м³ водорода, 5 м³ кислорода и 5 м³ углекислоты при давлении 6 бар и температуре 100 °С.

Решение:

Характеристическое уравнение для произвольного количества газа (15) -

$$P V = m R T.$$

Значение газовой постоянной берем из таблицы (приложение А).

Получаем:

$$R_{H_2} = 4124 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); R_{O_2} = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$R_{CO_2} = 188,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 5}{R \cdot 373} = \frac{8042,8}{R}.$$

Отсюда:

$$m_{H_2} = \frac{8042,8}{4124} = 1,95 \text{ кг}; \quad m_{O_2} = \frac{8042,8}{259,8} = 30,9 \text{ кг};$$

$$m_{CO_2} = \frac{8042,8}{189} = 42,6 \text{ кг}.$$

9 Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 10 МПа при 15°C. После расходования части кислорода давление понизилось до 7,6 МПа, а температура упала до 10°C. Определить массу израсходованного кислорода.

Решение:

Из характеристического уравнения (15) имеем:

$$m = P \cdot V / (R \cdot T).$$

Следовательно, начальная и конечная масса кислорода соответственно равны:

$$m_1 = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 288} = 2,673 \text{ кг}; \quad m_2 = \frac{7,6 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 283} = 2,067 \text{ кг}.$$

Таким образом, расход кислорода

$$\Delta m = 2,673 - 2,067 = 0,606 \text{ кг}.$$

10 Сосуд емкостью 10 м³ заполнен 25 кг углекислого газа. Определить абсолютное давление в сосуде, если температура в нем 27°C.

Решение:

Из характеристического уравнения (15) имеем:

$$P = \frac{m R T}{V} = \frac{25 \cdot 189 \cdot 300}{10} = 141700 \text{ Па}.$$

11 Определить подъемную силу воздушного шара, наполненного водородом, если объем его равен 1 м^3 при давлении 750 мм рт. ст. и температуре 15°C .

Решение:

На поверхности земли подъемная сила воздушного шара, наполненного водородом, равна разности сил тяжести (весов) воздуха и водорода в объеме шара:

$$N = N_{\text{возд}} - N_{\text{H}_2} = m_{\text{возд}} g - m_{\text{H}_2} g = g V (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}),$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести на уровне земли.

Значения плотностей воздуха и водорода могут быть определены из уравнения состояния (16) :

$$\frac{1}{v} = \rho = \frac{P}{R T}.$$

Значения газовых постоянных могут быть легко вычислены или взяты из таблицы (приложение А):

$$R_{\text{возд}} = 287 \text{ Дж/(кг·К)}; R_{\text{H}_2} = 4124 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Так как давление водорода и воздуха равно 750 мм рт. ст., то

$$\rho_{\text{возд}} = \frac{1 \cdot 750 \cdot 133,3}{287 \cdot 288} = 1,210 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{H}_2} = \frac{1 \cdot 750 \cdot 133,3}{4124 \cdot 288} = 0,084 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, подъемная сила шара

$$\Delta G = g V (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}) = 9,81 \cdot 1 \cdot (1,210 - 0,084) = 11,1 \text{ Н}.$$

12 Какова будет плотность окиси углерода при 20°C и давлении 710 мм рт. ст., если при 0°C и 760 мм рт. ст. она равна $1,251 \text{ кг/м}^3$?

Решение:

Согласно уравнению (22)
$$\rho_2 = \rho_1 \frac{P_2}{P_1} \frac{T_1}{T_2}.$$

Следовательно,
$$\rho_2 = 1,251 \frac{710}{760} \frac{273}{273 + 20} = 1,09 \text{ кг/м}^3.$$

Задачи

24 Определить плотность окиси углерода при давлении 1 бар и температуре 15°C.

Ответ: $\rho = 1,169 \text{ кг/м}^3$.

25 Определить плотность и удельный объем двуокиси углерода (CO_2) при нормальных условиях.

Ответ: $\rho_n = 1,964 \text{ кг/м}^3$; $v_n = 0,509 \text{ м}^3/\text{кг}$.

26 Определить удельный объем кислорода при температуре 280°C и давлении 23 бар.

Ответ: $v = 0,0625 \text{ м}^3/\text{кг}$.

27 Чему равна плотность воздуха при давлении 15 бар и температуре 20°C, если плотность воздуха при нормальных условиях равна 1,293 кг/м³?

Ответ: $\rho = 17,82 \text{ кг/м}^3$.

28 Определить массу углекислого газа, содержащегося в сосуде объемом 4 м³ при $t = 80^\circ\text{C}$. Давление газа по манометру равно 0,4 бар. Барометрическое давление 780 мм рт. ст.

Ответ: $m = 8,6 \text{ кг}$.

29 В цилиндре с подвижным поршнем находится 0,8 м³ воздуха при давлении 5 бар. Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до 8 бар температура воздуха не изменилась?

Ответ: $V = 0,5 \text{ м}^3$.

30 Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются с 1200 до 250°C. Во сколько раз уменьшается их объем, если давление газов в начале и в конце газопроводов одинаково?

Ответ: в 2,82 раза.

31 При какой температуре плотность азота (давлении 1,5 МПа) будет равна 3 кг/м³ ?

Ответ: $t = 1422^{\circ}\text{C}$.

32 Во сколько раз изменится плотность газа в сосуде, если при постоянной температуре показание манометра от $P_1 = 18$ бар уменьшится до $P_2 = 3$ бар? Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Ответ: $P_2 = 1/6 P_1$.

33 В воздухоподогреватель парового котла подается вентилятором 130 000 м³/ч воздуха при температуре 30°C.

Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если нагрев его производится до 400°C при постоянном давлении.

Ответ: $V = 288700 \text{ м}^3/\text{ч}$.

34 Определить газовую постоянную для кислорода, водорода и метана (CH₄).

Ответ: $R_{O_2} = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; $R_{H_2} = 4124 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;
 $R_{CH_4} = 518,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

35 Определить массу кислорода, содержащегося в баллоне емкостью 60 л, если давление кислорода по манометру равно 10,8 бар, а показание ртутного барометра — 745 мм рт. ст. при температуре 25°C.

Ответ: $m = 0,91 \text{ кг}$.

36 В сосуде находится воздух под разрежением 75 мм рт. ст. при температуре 0°C. Ртутный барометр показывает 748 мм при температуре ртути 20°C. Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

Ответ: $v = 0,876 \text{ м}^3/\text{кг}$.

37 Какой объем будут занимать 11 кг воздуха при давлении 0,44 МПа и температуре 18°C?

Ответ: $V = 2,088 \text{ м}^3$.

38 В цилиндре диаметром 60 см содержится 0,41 м³ воздуха при $P = 2,5$ бар и $t_1 = 35$ °C. До какой температуры должен нагреваться воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на 40 см?

Ответ: $t_2 = 117,6$ °C.

39 В цилиндрическом сосуде, имеющем внутренний диаметр 0,6 м и высоту 2,4 м, находится воздух при температуре 18°C. Давление воздуха составляет 7,65 бар. Барометрическое давление (приведенное к нулю) равно 764 мм рт. ст. Определить массу воздуха в сосуде.

Ответ: $m = 7,04$ кг.

40 В сосуде объемом 0,5 м³ находится воздух при давлении 0,2 МПа и температуре 20°C. Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило 420 мм рт. ст. при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру равно 768 мм при температуре ртути в нем, равной 18°C; разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути 20°C.

Ответ: $m = 1,527$ кг.

41 Резервуар объемом 4 м³ заполнен углекислым газом. Найти массу и силу тяжести (вес) газа в резервуаре, если избыточное давление газа 0,4 бар, температура его 80°C, а барометрическое давление воздуха 780 мм рт. ст.

Ответ: $m = 8,64$ кг; $N = 84,8$ Н.

42 Определить плотность и удельный объем водяного пара при нормальных условиях, принимая условно, что в этом состоянии пар будет являться идеальным газом.

Ответ: $\rho_n = 0,804 \text{ кг/м}^3$; $v = 1,243 \text{ м}^3/\text{кг}$.

43 Какой объем занимают 10 кмоль азота при нормальных условиях?

Ответ: $V = 224 \text{ м}^3$.

44 Какой объем занимает 1 кмоль газа при давлении 2 МПа и температуре 200 °С?

Ответ: $v = 1,97 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.

45 При какой температуре 1 кмоль газа занимает объем 4 м³, если давление газа $P = 1 \text{ кПа}$?

Ответ: $t = 198 \text{ °С}$.

46 Какова будет плотность кислорода при температуре 0 °С и давлении 600 мм рт. ст., если при 760 мм рт. ст. и 15 °С она равна 1,310 кг/м³?

Ответ: $\rho = 1,09 \text{ кг/м}^3$.

47 Во сколько раз больше воздуха (по массе) вмещает резервуар при 10 °С, чем при 50 °С, если давление остается неизменным?

Ответ: в 1,14 раза.

48 Баллон емкостью 0,9 м³ заполнен воздухом при температуре 17 °С. Присоединенный к нему вакуумметр показывает разрежение 600 мм рт. ст. Определить массу воздуха в баллоне, если показание барометра равно 740 мм рт. ст.

Ответ: $m = 0,2018 \text{ кг}$.

49 Масса пустого баллона для кислорода емкостью 50 л равно 80 кг. Определить массу баллона после заполнения его кислородом при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ до давления 100 бар.

Ответ: $m = 86,57$ кг.

50 Для автогенной сварки привезен баллон кислорода вместимостью 100 л. Определить массу кислорода, если его давление 12 МПа и температура 16°C .

Ответ: $m = 16$ кг.

51 Определить необходимый объем аэростата, наполненного водородом, если подъемная сила, которую он должен иметь на максимальной высоте $H = 7000$ м, равна 39 240 Н. Параметры воздуха на указанной высоте принять равными: $P = 0,41$ бар, $t = -30^\circ\text{C}$.

Насколько уменьшится подъемная сила аэростата при заполнении его гелием? Чему равен объем аэростата V_2 на поверхности земли при давлении 0,981 бар и температуре 30°C ?

Ответ: $V_1 = 7311$ м³; $\Delta H = -177$ Н; $V_2 = 3738$ м³.

52 Сжатый воздух в баллоне имеет температуру 15°C . Во время пожара температура воздуха в баллоне поднялась до 450°C .

Взорвется ли баллон, если известно, что при этой температуре он может выдержать давление не более 9,8 МПа? Начальное давление 4,8 МПа.

Ответ: да.

53 Сосуд емкостью 4,2 м³ наполнен 15 кг окиси углерода. Определить давление в сосуде, если температура газа в нем $t = 27^\circ\text{C}$.

Ответ: $P = 3,18$ бар.

54 Воздух, заключенный в баллон емкостью 0,9 м³, выпускают в атмосферу. Температура его в начале равна 27°C . Определить массу выпущенного воздуха, если начальное давление в баллоне

составляло 93,2 бар, после выпуска — 42,2 бар, а температура воздуха снизилась до 17°C.

Ответ: $m = 51,8$ кг.

55 По трубопроводу протекает 10 м³/с кислорода при температуре 127°C и давлении 4 бар. Определить массовый расход газа в секунду.

Ответ: $G = 33,5$ кг/с.

56 Поршневой компрессор всасывает в минуту 3 м³ воздуха при температуре 17°C и барометрическом давлении 750 мм рт. ст., нагнетает его в резервуар, объем которого равен 8,5 м³. За сколько минут компрессор поднимает давление в резервуаре до 7 бар, если температура в нем будет оставаться постоянной? Начальное давление воздуха составляло 750 мм рт. ст. при температуре 17°C.

Ответ: за 17 мин.

57 Дутьевой вентилятор подает в топку парового котла воздух в количестве 102000 м³/ч при 300°C и давлении 155 мм вод. ст. Барометрическое давление воздуха в помещении 755 мм рт. ст. Определить часовую производительность вентилятора в кубических метрах (при нормальных условиях).

Ответ: $V = 48\,940$ м³/ч.

58 Компрессор подает воздух в резервуар. За время работы компрессора давление в резервуаре повышается от атмосферного до 7 бар, а температура — от 20 до 25°C. Объем резервуара - 56 м³. Барометрическое давление, приведенное к 0°C, равно 750 мм рт. ст. Определить массу воздуха, поданного компрессором в резервуар.

Ответ: $m = 391,7$ кг.