

1.3 Смеси идеальных газов

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан **массовыми** (g_i) или **объемными** (r_i) долями:

$$g_i = \frac{m_i}{m}; \quad r_i = \frac{v_i}{v}, \quad (23)$$

где m_i — массы отдельных газов;

m — масса всей смеси;

v_i — приведенные объемы (объем каждого компонента отнесен к давлению и температуре смеси) компонентов газов, входящих в смесь;

v — общий объем газовой смеси.

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1; \quad \sum_{i=1}^n r_i = 1.$$

Для перевода массовых долей в объемные пользуются формулой

$$r_i = \frac{g_i R_i}{R_{см}}, \quad (24)$$

где $R_{см}$ - газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К);

R_i - газовая постоянная отдельных компонентов, входящих в смесь, Дж/(кг·К).

Перевод объемных долей в массовые производится по формуле

$$g_i = \frac{r_i R_{см}}{R_i}. \quad (25)$$

Плотность смеси $\rho_{\text{см}}$ определяется из выражения

$$\rho_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i \quad (26)$$

или, если известен массовый состав, по формуле

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}, \quad (27)$$

где ρ_i - плотность отдельных компонентов, входящих в смесь, кг/м³.

Молекулярная (мольная) масса газовой смеси $\mu_{\text{см}}$ определяется по формуле

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n (r_i \mu_i), \quad (28)$$

где μ_i - мольная масса компонентов, входящих в смесь, кг/кмоль.

Газовую постоянную смеси газов $R_{\text{см}}$ можно выразить либо через газовые постоянные отдельных компонентов, входящих в смесь, либо через молекулярную массу смеси

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n (g_i R_i), \quad \text{или} \quad (29)$$

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n (r_i \mu_i)}. \quad (30)$$

Связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов, входящих в смесь, устанавливается следующей зависимостью (закон Дальтона):

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (31)$$

где P — общее давление газовой смеси;

P_i — парциальные давления отдельных компонентов, входящих в смесь.

Парциальные давления определяются проще всего, если известны объемные доли отдельных компонентов, входящих в смесь:

$$P_i = P \cdot r_i, \quad (32)$$

где P_i — парциальное давление любого газа, входящего в смесь.

Примеры решения задач

13 Массовые доли кислорода и азота в атмосферном воздухе соответственно равны 0,232 и 0,768. Определить объемные доли кислорода и азота, газовую постоянную и молекулярную массу воздуха, парциальные давления кислорода и азота, если давление воздуха по барометру 760 мм рт. ст.

Решение:

Пересчет массовых долей в объемные осуществляется по уравнению (24). Газовая постоянная воздуха определяется по уравнению (29):

$$R_{\text{см}} = g_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} + g_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} = 0,232 \cdot 259,8 + 0,768 \cdot 296,8 = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Газовые постоянные кислорода и азота взяты из приложения А. Теперь можно рассчитать объемные доли компонентов смеси:

$$r_{\text{O}_2} = \frac{g_i R_i}{R_{\text{см}}} = \frac{0,232 \cdot 259,8}{287} = 0,21,$$

$$r_{\text{N}_2} = \frac{g_i R_i}{R_{\text{см}}} = \frac{0,768 \cdot 296,8}{287} = 0,79.$$

Молекулярная масса смеси определяется из уравнения (28):

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i = r_{\text{O}_2} \mu_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} \mu_{\text{N}_2} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,02 = 28,9 \text{ кг / кмоль}$$

или из уравнения (30):

$$\mu_{\text{см}} = \frac{8314}{R_{\text{см}}} = \frac{8314}{287} = 28,9 \text{ кг / кмоль.}$$

Парциальные давления определяем из уравнения (32):

$$P_{\text{O}_2} = r_{\text{O}_2} P = 0,21 \cdot 760 = 159,6 \text{ мм рт. ст.};$$

$$P_{\text{N}_2} = r_{\text{N}_2} P = 0,79 \cdot 760 = 600,4 \text{ мм рт. ст.}$$

14 Смесь газов состоит из водорода и окиси углерода. Массовая доля водорода 6,67%. Определить газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

Решение:

Газовую постоянную смеси находим по уравнению (29), газовые постоянные компонентов смеси приведены в приложении А:

$$R_{\text{см}} = g_1 R_1 + g_2 R_2 = 0,0667 \cdot 4124 + 0,9333 \cdot 296,8 = 552 \text{ Дж / (кг · К).}$$

Удельный объем газовой смеси найдем из характеристического уравнения (16):

$$v_H = \frac{R T_H}{P_H} = \frac{552 \cdot 273}{101325} = 1,49 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Задачи

59 В 1 м³ сухого воздуха содержится примерно 0,21 м³ кислорода и 0,79 м³ азота. Определить массовый состав воздуха, его газовую постоянную и парциальные давления кислорода и азота.

Ответ:

$$g_{O_2} = 0,232; \quad g_{N_2} = 0,768; \quad R = 287 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)};$$

$$P_{N_2} = 0,79 P_{\text{см}}; \quad P_{O_2} = 0,21 P_{\text{см}}.$$

60 Определить газовую постоянную смеси газов, состоящей из 1 м³ генераторного газа и 1,5 м³ воздуха, взятых при нормальных условиях, и найти парциальные давления составляющих смеси. Плотность генераторного газа принять равной 1,2 кг/м³.

$$\text{Ответ: } R_{\text{см}} = 295 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}; \quad P_{\text{г.г}} = 0,4 P_{\text{см}}; \quad P_{\text{возд}} = 0,6 P_{\text{см}}.$$

61 Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий: CO₂=12,3%; O₂=7,2%; N₂=80,5%. Найти молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем продуктов сгорания при давлении 750 мм. рт. ст. и температуре 800°C.

$$\text{Ответ: } \mu_{\text{см}} = 30,3 \text{ кг/кмоль}; \quad R_{\text{см}} = 274 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$v = 2,94 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad \rho_{\text{см}} = 0,34 \text{ кг/м}^3.$$

62 Генераторный газ имеет следующий объемный состав: H₂=7%; CH₄=2%; CO=27,6%; CO₂=4,85%; N₂=58,6%. Определить массовые доли, молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при 15°C и 0,1 МПа.

$$\text{Ответ: } g_{H_2} = 0,005; \quad g_{CH_4} = 0,012; \quad g_{CO} = 0,289; \quad g_{CO_2} = 0,079;$$

$$g_{N_2} = 0,615; \quad \mu_{\text{см}} = 26,72 \text{ кг/кмоль}; \quad R_{\text{см}} = 310,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$\rho_{\text{см}} = 1,095 \text{ кг/м}^3; \quad P_{H_2} = 0,07 \text{ бар}.$$

63 Газ коксовых печей имеет следующий объемный состав: H₂=57%; CH₄=23%; CO=6%; CO₂=2%; N₂=12%. Определить молекулярную массу, массовые доли, газовую постоянную и плотность при температуре 15°C и давлении 1 бар.

Ответ: $\mu_{\text{см}} = 10,77 \text{ кг/кмоль}$; $g_{\text{H}_2} = 0,107$; $g_{\text{CO}_2} = 0,082$;

$R_{\text{см}} = 772 \text{ Дж/(кг·K)}$; $\rho_{\text{см}} = 0,45 \text{ кг/м}^3$.

64 Генераторный газ состоит из следующих объемных частей: $\text{H}_2 = 18\%$; $\text{CO} = 24\%$; $\text{CO}_2 = 6\%$; $\text{N}_2 = 52\%$. Определить газовую постоянную генераторного газа и массовый состав входящих в смесь газов.

Ответ: $R_{\text{см}} = 342 \text{ Дж/(кг·K)}$; $g_{\text{CO}_2} = 10,86\%$;

$g_{\text{N}_2} = 60,03\%$; $g_{\text{H}_2} = 1,48\%$;

$g_{\text{CO}} = 27,63\%$.

65 Анализ продуктов сгорания топлива показал следующий их состав: $\text{CO}_2 = 12,2\%$; $\text{O}_2 = 7,1\%$; $\text{CO} = 0,4\%$; $\text{N}_2 = 80,3\%$. Определить массовый состав входящих в смесь газов.

Ответ: $g_{\text{CO}_2} = 17,7\%$; $g_{\text{O}_2} = 7,5\%$; $g_{\text{CO}} = 0,37\%$;

$g_{\text{N}_2} = 74,43\%$.

66 Определить газовую постоянную, плотность при нормальных условиях и объемный состав смеси, если ее массовый состав следующий: $\text{H}_2 = 8,4\%$; $\text{CH}_4 = 48,7\%$; $\text{C}_2\text{H}_4 = 6,9\%$; $\text{CO} = 17\%$; $\text{CO}_2 = 7,6\%$; $\text{O}_2 = 4,7\%$; $\text{N}_2 = 6,7\%$.

Ответ: $R_{\text{см}} = 717 \text{ Дж/(кг·K)}$; $r_{\text{O}_2} = 0,017$; $r_{\text{N}_2} = 0,028$;

$r_{\text{H}_2} = 0,484$; $r_{\text{CO}_2} = 0,02$; $\rho_{\text{H}} = 0,518 \text{ кг/м}^3$.

67 Определить газовую постоянную, удельный объем газовой смеси и парциальные давления ее составляющих, если объемный состав смеси следующий: $\text{CO}_2 = 12\%$; $\text{CO} = 1\%$; $\text{H}_2\text{O} = 6\%$; $\text{O}_2 = 7\%$; $\text{N}_2 = 74\%$, а общее давление ее составляет 750 мм рт. ст.

Ответ: $R_{\text{см}} = 281 \text{ Дж/(кг·K)}$; $v = 0,76 \text{ м}^3/\text{кг}$;

$$P_{\text{CO}_2} = 90 \text{ мм рт. ст.}$$

68 В резервуаре емкостью 125 м^3 находится газ при давлении 5 бар и температуре 18°C . Объемный состав газа следующий: $\text{H}_2=0,46$; $\text{CH}_4=0,32$; $\text{CO}=0,15$; $\text{N}_2=0,07$. После расходования некоторого количества газа давление его понизилось до 3 бар, а температура упала до 12°C . Определить массу израсходованного коксового газа.

Ответ: $m = 2167 \text{ кг}$.

69 Массовый состав смеси следующий: $\text{CO}_2=18\%$; $\text{O}_2=12\%$ и $\text{N}_2=70\%$. До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы при температуре 180°C 8 кг ее занимали объем, равный 4 м^3 .

Ответ: $P = 0,24 \text{ МПа}$.

70 Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если известно, что парциальное давление углекислого газа 1,2 бар, а давление смеси 3 бар.

Ответ: $g_{\text{CO}_2} = 0,512$; $g_{\text{N}_2} = 0,488$.

71 Газовая смесь имеет следующий массовый состав: $\text{CO}_2=12\%$; $\text{O}_2=8\%$ и $\text{N}_2=80\%$. До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы плотность ее составляла $1,6 \text{ кг/м}^3$?

Ответ: до $0,213 \text{ МПа}$.

72 Смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода называют гремучим газом. Определить газовую постоянную смеси.

Ответ: $R = 693 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

73 Определить массовые доли кислорода и азота, содержащиеся в воздухе, если известно, что в 1 м^3 воздуха содержится $0,21 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ и $0,79 \text{ м}^3 \text{ N}_2$. Определить плотность воздуха и парциальные давления компонентов при 30°C и 745 мм рт. ст.

ОТВЕТ: $g_{O_2} = 0,233$; $g_{N_2} = 0,767$; $\rho = 1,14 \text{ кг/м}^3$;

$P_{O_2} = 20,85 \text{ кПа}$; $P_{N_2} = 78,45 \text{ кПа}$.