

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших инженерных проблем, стоящих перед экономикой страны, является рациональное использование тепловой энергии.

Теория тепловых процессов и основные законы преобразования энергии являются основными в технических системах, которые представляют собой сложный комплекс технологических, механических, физико-химических и других факторов.

Раскрытие закономерностей превращения тепловой энергии в механическую работу позволяет обучающемуся понять особенности и принципы работы тепловых машин, в частности двигателей внутреннего сгорания, являющимися основными энергетическими средствами на автотранспорте и другой мобильной технике.

Процессы получения, использования и переноса теплоты имеют место практически во всех технических устройствах и технологических процессах современной техники. При расчете тепловых двигателей, холодильных и турбокомпрессорных установок, проектировании технологических процессов, восстановлении деталей инженер должен уметь правильно формулировать и решать разнообразные прикладные задачи с использованием основных законов термодинамики и теплообмена.

# 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Термодинамика технических систем** — наука о свойствах теплоты и законах взаимного преобразования теплоты и механической работы. Она является теоретической основой для расчета и проектирования тепловых двигателей (паровых и газовых турбин, реактивных и ракетных двигателей, двигателей внутреннего сгорания), а также компрессорных, сушильных и холодильных установок.

## 1.1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗОВ

Физические величины, значения которых определяют состояние термодинамической системы, называются **термодинамическими параметрами состояния**, основными из которых являются *давление, температура и удельный объем*. Между термодинамическими параметрами существует аналитическая зависимость, которая выражается *уравнением состояния газа*.

### *Расчетные формулы*

*Давление  $p$*  обусловлено взаимодействием молекул рабочего тела с поверхностью и численно равно силе, действующей по нормали, на единицу площади поверхности тела. Давление измеряется в *паскалях* (Па), Н/м<sup>2</sup>.

Абсолютное давление газа:

– при избыточном давлении

$$p = p_{\text{и}} + B;$$

– при разрежении

$$p = B - p_{\text{в}}.$$

Основное уравнение кинетической теории газов:

$$p = \frac{n \cdot m \cdot \omega^2}{3}.$$

Приведение показаний ртутного барометра к 0°C:

$$B_0 = B(1 - 0,000172t),$$

где  $p$  — абсолютное давление (в дальнейшем давление), Па;  $p_{\text{и}}$  — избыточное давление, Па;  $p_{\text{в}}$  — вакуумметрическое давление, Па;  $B$  — барометрическое давление, Па;  $B_0$  — барометрическое давление, приведенное к 0°C, Па;  $B$  — барометрическое давление при тем-

пературе воздуха  $t^{\circ}\text{C}$ , Па;  $n$  — число молекул в единице объёма;  $m$  — масса одной молекулы, кг;  $\omega$  — средняя скорость поступательного движения молекул, м/с.

*Температура (абсолютная)*  $T$  — мера интенсивности теплового движения молекул вещества. Абсолютная температура измеряется в кельвинах (К).

*Температурная шкала* — интервал между двумя (или тремя) опорными точками, поделенный на удобное число градусов.

Первой температурной шкалой была шкала, изобретенная *Габриэлем Фаренгейтом* в 1724 году. На шкале Фаренгейта (F) указаны три опорные точки: температура смеси (воды, льда и поваренной соли) 0 F, температура таяния льда 32 F и температура тела человека 96 F. Температура кипения воды при этом составляла 212 F. В США температурная шкала Фаренгейта является основной.

В 1730 году француз *Рене Реомюр* предложил температурную шкалу (R), опорной точкой которой является температура таяния льда. Температура кипения воды составляла 80 R. В России термометрами Реомюра пользовались до 1869 года.

В термодинамической шкале англичанина *Уильяма Томсона (Кельвина)* опорной точкой является абсолютный нуль 0 K, при которой происходит полное прекращение теплового движения молекул.

В температурной шкале шведа *Андерса Цельсия* (1742) опорными точками являются температура таяния льда  $100^{\circ}\text{C}$  и температура кипения воды  $0^{\circ}\text{C}$ .

Вскоре *Карл Линней* поменял местами опорные точки, и термометр Цельсия принял вид аптечного градусника *Цельсия* — *Линнея*.

На метеостанциях температура измеряется *максимально-минимальным термометром*. Ртутный максимальный термометр служит для измерения самых высоких температур. Спиртовой минимальный термометр служит для измерения предельно низких температур. Оба термометра (ртутный и спиртовой) устанавливаются в психрометрической будке метеостанции горизонтально рядом друг с другом. Температура воздуха всегда регистрируется в тени.

Температура по шкале *Кельвина*:

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

Температура по шкале *Фаренгейта*:

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32,$$

где  $t^{\circ}\text{C}$  — температура по шкале Цельсия;  $t^{\circ}\text{F}$  — температура по шкале Фаренгейта.

При нормальных условиях (н. у.)  $p = 101325 \text{ Па}$ ,  $T = 273,15 \text{ К}$ .

Удельный объем  $\vartheta$  — это объем единицы массы вещества:

$$\vartheta = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{M}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $\rho$  — плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $V$  — объем,  $\text{м}^3$ ;  $M$  — масса,  $\text{кг}$ .

Основные газовые законы устанавливают зависимость между начальными (индекс 1) и конечными (индекс 2) параметрами:

– закон Бойля — Мариотта:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1};$$

– закон Гей-Люссака:

$$\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2};$$

– закон Шарля:

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

Уравнение равновесного состояния идеального газа (уравнение Клапейрона) связывает между собой основные параметры состояния для  $M$ ,  $\text{кг}$ , газа:

$$p \cdot V = M \cdot R \cdot T.$$

Универсальное уравнение равновесного состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона) для 1 киломоля:

$$p \cdot V_{\mu} = \mu \cdot R \cdot T = R_{\mu} \cdot T,$$

где  $R$  — газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $V_{\mu}$  — объем киломоля газа (при н. у.  $V_{\mu} = 22,4 \text{ л}$ );  $\mu$  — молярная масса газа,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $R_{\mu}$  — универсальная газовая постоянная ( $R_{\mu} = 8314 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ).

Соотношение между газовой постоянной и универсальной газовой постоянной:

$$R = R_{\mu} / \mu.$$

### Упражнения и задачи

1. Определить плотность газа, если его удельный объем составляет  $0,78 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Дано:  $\vartheta = 0,78 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Найти:  $\rho$  — ?

Решение:

Используя соотношение  $\vartheta = \frac{1}{\rho}$ , получим

$$\rho = \frac{1}{\vartheta} = \frac{1}{0,78} = 1,28 \text{ кг/м}^3.$$

Ответ:  $\rho = 1,28 \text{ кг/м}^3$ .

2. Газ массой 1,3 кг занимает объем 1,7 м<sup>3</sup>. Определить удельный объем и плотность газа.

Дано:  $M = 1,3 \text{ кг}$ ;  $V = 1,7 \text{ м}^3$ .

Найти:  $\vartheta$  — ?  $\rho$  — ?

Решение:

Разделив массу газа на его объем, получим плотность газа:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{1,3}{1,7} = 0,76 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда удельный объем газа составит

$$\vartheta = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,76} = 1,31 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Ответ:  $\rho = 0,76 \text{ кг/м}^3$ ;  $\vartheta = 1,31 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

3. Определить массу азота в сосуде объемом 3 м<sup>3</sup> при температуре 25°C. Давление газа по манометру составляет 0,05 МПа, барометрическое давление — 102650 Па.

Дано:  $V = 3 \text{ м}^3$ ;  $t = 25^\circ\text{C}$ .;  $p_{\text{и}} = 0,05 \text{ МПа}$ ;  $B = 102650 \text{ Па}$ .

Найти:  $M$  — ?

Решение:

Абсолютное давление азота:

$$p = p_{\text{и}} + B = 0,05 \cdot 10^6 + 102650 = 152650 \text{ Па}.$$

Газовая постоянная азота  $R = 296,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  (таблица П.2.1).

Абсолютная температура азота:

$$T = 25 + 273 = 298 \text{ К}.$$

Масса азота:

$$M = \frac{pV}{RT} = \frac{152650 \cdot 3}{296,8 \cdot 298} = 5,2 \text{ кг}.$$

Ответ:  $M = 5,2 \text{ кг}$ .

4. Воздух, находящийся при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  и давлении  $0,1\text{ МПа}$  в баллоне емкостью  $2\text{ м}^3$ , подогревают до температуры  $60^{\circ}\text{C}$ . Определить массу и давление нагретого воздуха.

Дано:  $V = 2\text{ м}^3$ ;  $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2 = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $p_1 = 0,1\text{ МПа}$ .

Найти:  $M$  — ?  $p_2$  — ?

Решение:

Согласно закону Шарля, давление нагретого воздуха составит

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot (60 + 273)}{20 + 273} = 113652\text{ Па}.$$

Газовая постоянная воздуха  $R = 287\text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  (таблица П.2.1).

Масса воздуха:

$$M = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{113652 \cdot 2}{287 \cdot (20 + 273)} = 2,7\text{ кг}.$$

Ответ:  $M = 2,7\text{ кг}$ ;  $p_2 = 113652\text{ Па}$ .

5. В сосуде объемом  $0,5\text{ м}^3$  находится воздух при давлении  $0,2\text{ МПа}$  и температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило  $56\text{ кПа}$ , при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру равно  $102,4\text{ кПа}$  при температуре ртути в нем, равной  $18^{\circ}\text{C}$ ; разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути  $20^{\circ}\text{C}$ .

6. Молярный объем некоторого двухатомного газа при давлении  $0,02\text{ МПа}$  и температуре  $T$  в три раза больше, чем при нормальных условиях. Определить эту температуру и род газа, если его плотность при указанных давлении и температуре равна  $0,4167\text{ кг}/\text{м}^3$ .

7. Во сколько раз увеличится абсолютное давление пара в паровом котле, если показания манометра изменятся с  $0,2\text{ МПа}$  до  $0,4\text{ МПа}$ , а параметры состояния окружающего воздуха не изменятся и составят: давление —  $770\text{ мм рт. ст.}$ , температура —  $20^{\circ}\text{C}$ ?

8. В резервуар вместимостью  $8,5\text{ м}^3$  компрессор подает воздух при температуре  $15^{\circ}\text{C}$  и давлении  $0,988\text{ МПа}$ . За какое время компрессор, подача которого составляет  $3\text{ м}^3/\text{мин}$ , наполнит резервуар до давления  $1,8\text{ МПа}$ , если температура воздуха в резервуаре при указанном давлении  $47^{\circ}\text{C}$ ? Перед накачиванием резервуар был сообщен с атмосферой.

9. Определить барометрическое давление, плотность и температуру воздуха на высоте  $9500\text{ м}$  над уровнем моря, если известно, что на уровне моря давление составляет  $101325\text{ Па}$ , а температура  $273,15\text{ К}$ .

10. В цилиндре с подвижным поршнем находится  $0,6 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $0,1 \text{ МПа}$ . Как должно измениться давление, если объем уменьшится в 3 раза, а температура останется постоянной?

11. В газоход парового котла подаются дымовые газы, которые охлаждаются с  $1500^\circ\text{C}$  до  $150^\circ\text{C}$ . Как изменится их объем, если давление по длине газохода не изменяется?

12. Определить массу поступившего в цилиндр дизеля воздуха с температурой  $20^\circ\text{C}$  при давлении  $0,1 \text{ МПа}$ . Размеры цилиндра: диаметр  $d = 0,11 \text{ м}$ ; ход поршня  $h = 0,125 \text{ м}$ .

13. По трубопроводу протекает  $10 \text{ м}^3/\text{с}$  кислорода при температуре  $127^\circ\text{C}$  и давлении  $0,4 \text{ МПа}$ . Определить массовый расход газа в секунду.

14. Цилиндр диаметром  $300 \text{ мм}$  плотно закрыт подвешенным на пружине поршнем (условно невесомым и скользящим без трения). В цилиндре образован вакуум, составляющий  $90\%$  от барометрического давления, равного  $101325 \text{ Па}$ . Определить силу натяжения пружины, если поршень неподвижен.

15. Для пуска двигателя внутреннего сгорания используется сжатый воздух, хранящийся в баллоне. Определить отношение абсолютных давлений в баллоне до и после пуска, если до пуска показание манометра было  $5,6 \text{ МПа}$ , а после пуска  $2,9 \text{ МПа}$ . Барометрическое давление  $742 \text{ мм рт. ст.}$  при температуре  $293 \text{ К}$ .

16. По результатам испытаний паровой турбины, разрежение в ее конденсаторе составляет  $95\%$  при барометрическом давлении  $95 \text{ кПа}$  и температуре  $0^\circ\text{C}$ . Определить абсолютное давление в конденсаторе.

17. В поршневом компрессоре газ сжимается при движении поршня по направлению к днищу цилиндра; сжатый газ подается в резервуар высокого давления. Объем цилиндров  $0,012 \text{ м}^3$ . Определить угловую скорость вала компрессора, если на нагнетание воздуха в резервуар вместимостью  $1,2 \text{ м}^3$  до давления  $4 \text{ МПа}$  при температуре окружающей среды затрачено  $10$  минут, а начальное давление в резервуаре равно  $0,8 \text{ МПа}$ , температура и давление окружающей среды  $10^\circ\text{C}$  и  $0,1 \text{ МПа}$ .

18. Масса воздуха, заключенного между днищем цилиндра и поршнем, равна  $0,6 \text{ кг}$ . Диаметр цилиндра  $0,5 \text{ м}$ , давление и температура внутри цилиндра соответственно  $0,35 \text{ МПа}$  и  $400 \text{ К}$ . При неизменном давлении движущийся без трения поршень перемещается на  $20 \text{ см}$ . Определить начальное расстояние поршня от днища цилиндра и температуру в цилиндре после перемещения поршня.

19. Двигатель внутреннего сгорания мощностью 120 кВт расходует 0,024 кг топлива на 1 кг рабочего тела. Определить объемный расход рабочего тела, если удельный расход топлива составляет 190 г/(кВт·ч). Воздух всасывается в цилиндры двигателя из помещения с параметрами: давление — 0,1 МПа, температура — 290 К. Считать, что рабочее тело имеет физические свойства сухого воздуха.

20. Масса баллона с газом 2,9 кг, при этом давление в баллоне по манометру 4 МПа. После израсходования части газа при неизменной температуре давление в баллоне понизилось до 1,5 МПа, при этом масса баллона с газом уменьшилась до 1,4 кг. Определить плотность газа при давлении 1013 гПа, если вместимость баллона 0,5 м<sup>3</sup>.

## 1.2. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

**Газовой смесью** называется смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции.

Газовые смеси характеризуются параметрами состояния, долями  $i$ -го компонента и их связями между собой.

### *Расчетные формулы*

Уравнение состояния газовой смеси:

$$p_{\text{см}} \cdot V_{\text{см}} = M_{\text{см}} \cdot R_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}},$$

где  $p_{\text{см}}$  — абсолютное давление смеси, Па;  $V_{\text{см}}$  — объем смеси, м<sup>3</sup>;  $M_{\text{см}}$  — масса смеси, кг;  $R_{\text{см}}$  — газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К);  $T_{\text{см}}$  — абсолютная температура смеси, К.

Закон Дальтона для газовых смесей:

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_1^n p_i.$$

Массовая доля  $i$ -го компонента газовой смеси:

$$g_i = \frac{m_i}{M_{\text{см}}}.$$

Объемная доля  $i$ -го компонента газовой смеси:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}.$$

Мольная доля  $i$ -го компонента газовой смеси:

$$y_i = \frac{n_i}{n_{\text{см}}},$$

где  $p_i$  — парциальное давление  $i$ -го компонента в газовой смеси, Па;  $m_i$  — масса  $i$ -го компонента газовой смеси, кг;  $V_i$  — объем  $i$ -го ком-

понента газовой смеси, м<sup>3</sup>;  $n_i$  и  $n_{\text{см}}$  — количество вещества  $i$ -го компонента и всей газовой смеси, моль.

Соотношение между массовыми и объёмными долями:

$$g_i = \frac{V_i \cdot \rho_i}{V_{\text{см}} \cdot \rho_{\text{см}}} = r_i \frac{\rho_i}{\rho_{\text{см}}} = r_i \frac{R_{\text{см}}}{R_i} = r_i \frac{\mu_i}{\mu_{\text{см}}},$$

где  $\rho_i$  и  $\rho_{\text{см}}$  — плотность  $i$ -го компонента и газовой смеси;  $R_i$  и  $R_{\text{см}}$  — газовые постоянные  $i$ -го компонента и газовой смеси, Дж/(кг·К);  $\mu_i$  и  $\mu_{\text{см}}$  — молекулярная масса  $i$ -го компонента и газовой смеси, кг/кмоль.

Молекулярная (кажущаяся) масса газовой смеси:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{m_{\text{см}}}{n_{\text{см}}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}} = \sum_1^n r_i \mu_i.$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{\text{см}} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{см}}} = \sum_1^n g_i \cdot R_i = \frac{1}{\sum_1^n \frac{r_i}{R_i}}.$$

Для газовых смесей справедливы выражения

$$\sum_1^n g_i = 1; \quad \sum_1^n r_i = 1.$$

Парциальные давления  $i$ -ых компонентов газовой смеси:

$$p_i = r_i \cdot p_{\text{см}} = p_{\text{см}} \cdot g_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}}.$$

### ***Упражнения и задачи***

1. Сухой атмосферный воздух состоит из 23,2% кислорода и 76,8% азота. Определить объёмный состав воздуха, газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу и парциальные давления кислорода и азота при нормальных условиях.

Дано:  $g_{\text{O}_2} = 23,2$ ;  $g_{\text{N}_2} = 76,8$ .

Найти:  $r_{\text{O}_2}$  — ?  $r_{\text{N}_2}$  — ?  $R_{\text{см}}$  — ?  $\mu_{\text{см}}$  — ?  $p_{\text{O}_2}$  — ?  $p_{\text{N}_2}$  — ?

Решение:

Для определения объёмных долей соответствующих компонентов воздуха воспользуемся формулой соотношения объёмных и массовых долей:

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}.$$

Молекулярные массы компонентов воздуха составляют (таблица П.2.1): для кислорода  $\mu_{O_2} = 32$ , для азота  $\mu_{N_2} = 28$ .

Тогда объемная доля кислорода

$$r_{O_2} = \frac{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{23,2}{32}}{\frac{23,2}{32} + \frac{76,8}{28}} = 0,21.$$

С учетом выражения  $\sum r_i = 1$ , имеем

$$r_{N_2} = 1 - r_{O_2} = 1 - 0,21 = 0,79.$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{cm} = \sum_1^n g_i R_i.$$

Значение газовых постоянных конкретных газов приведено в таблице П.2.1 или может быть определено по формуле

$$R_i = \frac{R_\mu}{\mu_i}.$$

Газовые постоянные для отдельных компонентов смеси будут равны:

$$R_{O_2} = \frac{R_\mu}{\mu_{O_2}} = \frac{8314}{32} = 259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$R_{N_2} = \frac{R_\mu}{\mu_{N_2}} = \frac{8314}{28} = 296,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Газовая постоянная смеси составит

$$R_{cm} = g_{O_2} R_{O_2} + g_{N_2} R_{N_2} = 0,232 \cdot 259,8 + 0,768 \cdot 296,9 = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Кажущаяся молекулярная масса газовой смеси определится из соотношения

$$\mu_{cm} = \sum r_i \mu_i = r_{O_2} \mu_{O_2} + r_{N_2} \mu_{N_2} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28 = 28,9 \text{ кг/кмоль}.$$

Парциальное давление компонентов газовой смеси:

$$p_i = r_i \cdot p_{cm}.$$

По условию задачи давление газовой смеси при нормальных условиях составляет 101325 Па, следовательно

$$P_{O_2} = r_{O_2} \cdot p = 0,21 \cdot 101325 = 21278 \text{ Па},$$

$$P_{N_2} = r_{N_2} \cdot p = 0,79 \cdot 101325 = 80047 \text{ Па}.$$

Парциальное давление азота может быть определено и другим способом. Согласно закону Дальтона  $\sum_1^n P_i = 1$ , тогда

$$P_{N_2} = p - p_{O_2} = 101325 - 21278 = 80047 \text{ Па}.$$

Ответ:  $r_{O_2} = 0,21$ ;  $r_{N_2} = 0,79$ ;  $R_{\text{см}} = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\mu_{\text{см}} = 28,9$ ;

$$p_{O_2} = 21278 \text{ Па}; p_{N_2} = 80047 \text{ Па}.$$

2. В резервуаре емкостью  $150 \text{ м}^3$  находится коксовый газ при давлении 0,5 МПа и температуре  $25^\circ\text{C}$ . Состав газа в объемных долях следующий: 45% водорода  $\text{H}_2$ , 30% метана  $\text{CH}_4$ , 16% угарного газа  $\text{CO}$  и 9% азота  $\text{N}_2$ . Определить массу израсходованного газа, если в результате его расхода давление понизилось до 0,25 МПа, а температура — до  $10^\circ\text{C}$ .

Дано:  $V = 150 \text{ м}^3$ ;  $p_{\text{смн}} = 0,5 \text{ МПа}$ ;  $t_{\text{смн}} = 25^\circ\text{C}$ ;  $p_{\text{смк}} = 0,25 \text{ МПа}$ ;  $t_{\text{смк}} = 10^\circ\text{C}$ ;  $r_{\text{H}_2} = 0,45$ ;  $r_{\text{CH}_4} = 0,3$ ;  $r_{\text{CO}} = 0,16$ ;  $r_{\text{N}_2} = 0,09$ .

Найти:  $M_{\text{изр}}$  — ?

Решение:

Масса израсходованной смеси может быть определена как разность между первоначальной ( $M_{\text{н}}$ ) и оставшейся конечной ( $M_{\text{о}}$ ) массами газовой смеси:

$$M_{\text{изр}} = M_{\text{н}} - M_{\text{о}}.$$

Первоначальную массу смеси определим из уравнения Менделеева — Клапейрона:

$$P_{\text{смн}} V_{\text{см}} = M_{\text{н}} R_{\text{см}} T_{\text{смн}},$$

где  $P_{\text{смн}}$ ,  $T_{\text{смн}}$  — начальные давление и температура смеси (заданы по условию задачи).

Для нахождения газовой постоянной смеси определим кажущуюся молекулярную массу смеси:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{см}} &= \sum_1^n r_i \mu_i = r_{\text{H}_2} \mu_{\text{H}_2} + r_{\text{CH}_4} \mu_{\text{CH}_4} + r_{\text{CO}} \mu_{\text{CO}} + r_{\text{N}_2} \mu_{\text{N}_2} = \\ &= 0,45 \cdot 2 + 0,3 \cdot 16 + 0,16 \cdot 28 + 0,09 \cdot 28 = 12,7 \text{ кг/кмоль}. \end{aligned}$$

Тогда газовая постоянная смеси будет равна

$$R_{\text{см}} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{12,7} = 654,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Определим первоначальную массу смеси:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{смн}} V_{\text{см}}}{R_{\text{см}} T_{\text{смн}}} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 150}{654,6 \cdot 298} = 384,5 \text{ кг}.$$

Аналогично определяем оставшуюся массу газовой смеси:

$$M_{\text{о}} = \frac{P_{\text{смк}} V_{\text{см}}}{R_{\text{см}} T_{\text{смк}}} = \frac{0,25 \cdot 10^6 \cdot 150}{654,6 \cdot 283} = 202,4 \text{ кг}.$$

Таким образом, израсходованная масса смеси будет равна

$$M_{\text{изр}} = M_{\text{н}} - M_{\text{о}} = 384,5 - 202,4 = 182,1 \text{ кг}.$$

Ответ:  $M_{\text{изр}} = 182,1 \text{ кг}.$

3. Объемные доли компонентов смеси газов составляют: 25% углекислого газа  $\text{CO}_2$  и 75% кислорода  $\text{O}_2$ . Температура смеси  $100^\circ\text{C}$ , давление —  $0,075 \text{ МПа}$ . Определить парциальные давления компонентов, их массовые доли, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную и плотность смеси.

4. Газовые баллоны для автомобилей, оснащенных газобаллонной аппаратурой, заполняются до давления  $20 \text{ МПа}$  при температуре  $15^\circ\text{C}$ . Состав газа в объемных долях следующий: 71,9% метана  $\text{CH}_4$ , 10% этана  $\text{C}_2\text{H}_6$ , 3,3% пропана  $\text{C}_3\text{H}_8$ , 2,5% бутана  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , 1,6% пентана  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  и 10,7% углекислого газа  $\text{CO}_2$ . Определить массу газа при постоянном давлении в баллоне диаметром  $220 \text{ мм}$  и высотой  $1200 \text{ мм}$ , а также плотность смеси после израсходования половины первоначальной массы газа.

5. Газовая смесь, заданная объемными долями, состоит из 12% углекислого газа  $\text{CO}_2$ , 1% угарного газа  $\text{CO}$ , 5% водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$ , 6% кислорода  $\text{O}_2$ , 76% азота  $\text{N}_2$  и находится под давлением  $0,1 \text{ МПа}$  при температуре  $10^\circ\text{C}$ . Определить газовую постоянную и удельный объем смеси, парциальное давление ее составляющих.

6. Газовая смесь массой  $10 \text{ кг}$  при нормальных условиях имеет следующий состав: азот  $\text{N}_2$  — 75%, углекислый газ  $\text{CO}_2$  — 15%, кислород  $\text{O}_2$  — 10% и находится в цилиндре с подвижным поршнем. Определить давление смеси, если ее объем стал равен  $5 \text{ м}^3$ , а температура повысилась до  $200^\circ\text{C}$ .

7. Смесь двух газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ ) находится под давлением  $0,5 \text{ МПа}$ . Определить массовый состав газовой смеси, если парциальное давление кислорода составляет  $150 \text{ кПа}$ .

8. При сгорании топлива образуется смесь газов следующего состава, выраженная в объемных долях: 12% углерода С, 7,3% кислорода  $O_2$ , 1% угарного газа СО и 79,7% азота  $N_2$ . Определить массовый состав газовой смеси.

9. В баллон емкостью 2 м<sup>3</sup> помещено 2 кг угарного газа СО и 5 кг азота  $N_2$ . Определить массовый и объемный составы смеси, ее давление, а также парциальное давление газов, если известно, что температура газа в баллоне составляет 100°С.

10. Соотношение компонентов газовой смеси, массой 25 кг, состоящей из водорода  $H_2$ , углекислого газа  $CO_2$ , азота  $N_2$  и метана  $C_2H_4$ , составляет соответственно 1:3:4:7. Определить массовые доли компонентов смеси и их парциальные давления, а также емкость баллона, в котором можно перевезти данную смесь, если известно, что допустимое давление не должно превышать 0,2 МПа. Температуру смеси принять равной 25°С.

11. Воздух массой 5 кг находится в сосуде объемом 2 м<sup>3</sup>. В сосуд добавили 4 кг углекислого газа. Определить давление, создавшееся в сосуде, объемные и массовые доли воздуха и углекислого газа, если после смешивания температура достигла 45°С. Найти для смеси кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную и плотность при нормальных условиях.

12. Состав продуктов сгорания органического топлива в объемных долях: 13% углекислого газа  $CO_2$ , 8% кислорода  $O_2$ , 79% азота  $N_2$ . Найти кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную и удельный объем продуктов сгорания, парциальные давления компонентов, если давление и температура продуктов сгорания равны 95 кПа и 650°С соответственно.

### 1.3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ

**Теплоемкостью** называется количество теплоты, которое необходимо при нагревании единицы количества газа (1 кг, 1 м<sup>3</sup>, 1 кмоль) для изменения температуры на 1 К в термодинамическом процессе. В зависимости от единицы количества нагреваемого газа теплоемкости могут быть массовыми ( $c$ ), объемными ( $c'$ ) и мольными ( $\bar{c}$ ).

#### *Расчетные формулы*

Мольная, массовая и объёмная теплоёмкости связаны между собой следующими зависимостями:

$$\bar{c} = c \cdot \mu; \quad \bar{c} = c' \cdot V_n; \quad c' = c \cdot \rho_n.$$

Уравнение Майера:

$$\bar{c}_p - \bar{c}_v = R_\mu.$$

Показатель адиабаты:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v}.$$

Теплоёмкости газовых смесей:

— объёмная

$$c'_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \cdot c'_i,$$

— массовая

$$c_{\text{см}} = \sum_1^n g_i \cdot c_i,$$

— мольная

$$\bar{c}_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \cdot c_i \cdot \mu_i.$$

Количество затраченной теплоты в процессе нагревания 1 кг газа в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ :

$$q = c_{m_2} \cdot t_2 - c_{m_1} \cdot t_1,$$

где  $\bar{c}$  — мольная теплоёмкость, Дж/(моль·К);  $c'$  — объёмная теплоёмкость, Дж/(м³·К);  $c$  — массовая теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $\mu$  — молекулярная масса, кг/моль;  $\rho_n$  — плотность газа при нормальных условиях, кг/м³;  $V_n$  — объём газа при нормальных условиях;  $\bar{c}_p$  — мольная изобарная теплоёмкость, Дж/(моль·К);  $\bar{c}_v$  — мольная изохорная теплоёмкость, Дж/(моль·К);  $c_{m_1}$  и  $c_{m_2}$  — средние теплоёмкости в пределах от 0°C до  $t_1$  и от 0°C до  $t_2$ .

Количество теплоты при нагревании 1 кг газа:

— в изохорном процессе

$$q_9 = c_{9m_2} \cdot t_2 - c_{9m_1} \cdot t_1,$$

— в изобарном процессе

$$q_p = c_{pm_2} \cdot t_2 - c_{pm_1} \cdot t_1.$$

Количество затраченной теплоты в изохорном и изобарном процессах:

— при нагревании  $M$ , кг, газа:

$$Q_9 = M(c_{9m_2} \cdot t_2 - c_{9m_1} \cdot t_1) = q_9 \cdot M,$$

$$Q_p = M(c_{pm_2} \cdot t_2 - c_{pm_1} \cdot t_1) = q_p \cdot M,$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)