

Набережночелнинский институт К(П)ФУ

Кафедра высокоэнергетических процессов и агрегатов

## **ТЕРМОДИНАМИКА**

*Учебно-методическое пособие*

Набережные Челны

2015

УДК

Рецензент канд.техн.наук И.Д. Галимянов

Учебно-методическое пособие «Термодинамика» к практическим занятиям по дисциплине «Тепловые процессы в энергетике» для студентов по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также по дисциплине «Термодинамика и тепломассообмен» для всех технических специальностей / Составители: А.Д. Самигуллин, А.Т. Галиакбаров, Д.И. Ибрафиров – Набережные Челны: Издательско - полиграфический центр Набережночелнинского ин-та КФУ, 2015. – 26 с.

Учебное пособие написано в соответствии с рабочей учебной программой дисциплин. Методические указания могут быть использованы для проведения практических занятий по дисциплине «Тепловые процессы в энергетике» для студентов по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также по дисциплине «Термодинамика и тепломассообмен» для всех технических специальностей.

## ***I. Параметры состояния.***

Во всех термодинамических уравнениях используется *абсолютное давление*

$$P_{абс} = P_{изб} + P_{бар}, \quad (1.1)$$

$$P_{абс} = P_{бар} - P_{вак}, \quad (1.2)$$

и *абсолютная температура*, 0 К

$$T = t + 273.15, \quad (1.3)$$

где  $P_{изб}$ ,  $P_{бар}$ ,  $P_{вак}$  - давления, измеренные манометром, барометром и вакуумметром соответственно;

$t$  - температура, 0С;

Широко применяют в теплотехнических расчетах киломоль (кмоль) вещества, то есть  $\mu$  кг вещества, где  $\mu$  - молекулярный вес.

*Мольный объем* определяют по формуле

$$\mu v = \frac{V}{M}, \text{ м}^3/\text{кмоль} \quad (1.4)$$

где  $V$  - объем вещества, м<sup>3</sup>

$M$  - число молей вещества.

*Плотность вещества* можно определить, используя следующую формулу:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3 \quad (1.5)$$

где  $m$  - масса вещества, кг

$V$  - объем вещества, м<sup>3</sup>.

Величина обратная плотности равна *удельному объему вещества*, то есть

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (1.6)$$

**Пример 1.** Манометр, установленный в открытой кабине самолета, находящегося на земле, и измеряющий давление масла, показывает 6 кгс/см<sup>2</sup> при показании барометра 752 мм рт. ст.

Каково абсолютное давление масла, выраженное в Па, кгс/м<sup>2</sup>, мм рт. ст., мм вод. ст.

*Решение:*

Манометр измеряет избыточное давление, то есть

$$P_{изб} = 6 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 6 \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 58,86 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Барометрическое давление соответственно

$$P_{бар} = 752 \text{ мм.рт.ст.} = 752 \cdot 133 = 1,00016 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Таким образом, абсолютное давление по формуле (1.1) будет равно:

$$P_{абс} = P_{изб} + P_{бар} = 5,89 \cdot 10^5 + 1 \cdot 10^5 = 6,89 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$P_{абс} = 6,89 \cdot 10^5 \text{ Па} = 70234 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2} = 7,0234 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 5180 \text{ мм рт. ст.}$$

**Пример 2.** В машинном зале электростанции работают три турбины, в конденсаторах которых поддерживается абсолютное давление  $P_{абс1}=2,94$  кПа,  $P_{абс2} = 3,923$  кПа,  $P_{абс3} = 4,9$  кПа. Определить величины вакуумов в процентах барометрического давления. Показания барометра в машинном зале 753 мм рт. ст.

*Решение:*

Абсолютное давление согласно формуле (1.2):

$$P_{абс} = P_{бар} - P_{вак} \text{ или } P_{вак} = P_{бар} - P_{абс}.$$

Таким образом

$$P_{вак1} = 753 \cdot 133 - 2,94 \cdot 10^3 = 97,209 \cdot 10^3 \text{ Па},$$

$$P_{вак2} = 96,226 \cdot 10^3 \text{ Па},$$

$$P_{вак3} = 95,249 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Определим величины вакуумов:

$$\omega_1 = \frac{P_{\text{вак1}}}{P_{\text{бар}}} = \frac{97,209 \cdot 10^3}{753 \cdot 133} \cdot 100\% = 97,1\%$$

$$\omega_2 = \frac{P_{\text{вак2}}}{P_{\text{бар}}} = 96,1\% ;$$

$$\omega_3 = \frac{P_{\text{вак3}}}{P_{\text{бар}}} = 95,1\% .$$

## **II. Уравнение состояния идеального газа.**

Опыт и теория показывают, что давление, удельный объем и температура однородного тела не являются зависимыми.

В равновесном состоянии параметры обладают свойством, которое может быть записано в такой форме:

$$\varphi(\rho, v, T) = 0.$$

Вид функции  $\varphi$  зависит от природы тела и различен для разных тел. Наиболее простым уравнением состояния является уравнение Клапейрона – Менделеева для идеального газа:

$$p \cdot v - R \cdot T = 0 \text{ или } p \cdot v = R \cdot T. \quad (2.1)$$

где  $p$  - абсолютное давление, Па

$v$  - удельный объем, м<sup>3</sup>/кг

$T$  - абсолютная температура, °К

$R$  - газовая постоянная, Дж/кг\*°К.

Уравнение состояния для произвольного количества газа  $m$ :

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T, \quad (2.2)$$

где  $V = m \cdot v$  - объем вещества, м<sup>3</sup>

Газовая постоянная определяется свойствами рабочих тел, поэтому для различных тел значения  $R$  различны.

Газовая постоянная конкретного рабочего тела определяется по формуле:

$$R = \frac{8314}{\mu}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}, \quad (2.3)$$

где 8314 Дж/ кмоль\*град. – универсальная газовая постоянная.

Весьма часто в расчетах используются уравнения для определения плотности и удельного объема:

$$\rho = \frac{\rho_0 \cdot p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}, \quad (2.4)$$

$$v = \frac{v_0 \cdot p_0 \cdot T}{p \cdot T_0}, \quad (2.5)$$

где величины с индексом «0» представляют собой параметры газов при нормальном физическом состоянии. За нормальное физическое состояние принимают состояние газов при давлении 760 мм рт. ст. и температуре  $0^\circ\text{C} = 273^\circ\text{K}$ . данные плотности и удельного объема при этих условиях можно определить по следующим зависимостям:

$$\rho_0 = \frac{\mu}{22,4} \text{ кг/м}^3, \quad (2.6)$$

$$v_0 = 22,4 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.7)$$

**Пример 1.** Определить значения газовых постоянных в СИ для газов: ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , окись углерода  $\text{CO}$ , аммиак  $\text{NH}_3$ , озон  $\text{O}_3$ .

*Решение:*

Для того, чтобы определить по формуле (2.3) газовую постоянную необходимо найти молекулярные массы соответствующих газов:

$$\mu_{\text{C}_2\text{H}_2} = 12 \cdot 2 + 1 \cdot 2 = 26 \text{ кг/кмоль},$$

$$\mu_{\text{CO}} = 12 \cdot 1 + 16 \cdot 1 = 28 \text{ кг/кмоль},$$

$$\mu_{\text{NH}_3} = 14 \cdot 1 + 1 \cdot 3 = 17 \text{ кг/кмоль},$$

$$\mu_{\text{O}_3} = 16 \cdot 3 = 48 \text{ кг/кмоль}.$$

$$R_{\text{C}_2\text{H}_2} = \frac{8314}{\mu_{\text{C}_2\text{H}_2}} = \frac{8314}{26} = 319,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град.}},$$

$$R_{CO} = 297 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град.}},$$

$$R_{NH_3} = 489 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град.}},$$

$$R_{O_3} = 173 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град.}}.$$

**Пример 2.** Молекулярный вес саратовского природного газа равен приблизительно  $\mu=17,1$  кг/кмоль. Определить его плотность, удельный объем при нормальных физических условиях, а также при давлении 1,2 бар и температуре  $-13^\circ\text{C}$ .

*Решение:*

Определим газовую постоянную газа по формуле (2.3):

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{17,1} = 486,2, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}.$$

Из уравнения состояния идеального газа (2.2), зная что,  $\rho = \frac{m}{V}$  определим плотность и удельный объем природного газа:

$$\rho_0 = \frac{p}{R \cdot T}, \quad v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{R \cdot T}{p}.$$

При нормальных физических условиях плотность составит  $0,761$  кг/м<sup>3</sup>, а удельный объем –  $1,313$  м<sup>3</sup>/кг.

По формулам (2.4) и (2.5) определим плотность и удельный объем при  $T=-13^\circ\text{C}=260$  К и  $p=1,2$  бар:  $\rho=0,949$  кг/м<sup>3</sup>,  $v=1,053$  м<sup>3</sup>/кг.

### **III. Газовые смеси.**

В теплотехнике чаще всего применяют в качестве рабочего тела не однородный газ, а смесь нескольких газов. Каждый газ в смеси ведет себя так, как если бы он один занимал при той же температуре весь объем, занимаемый смесью.

Давление, которое имел бы отдельный газ при температуре и объеме смеси, называется парциальным давлением.

Согласно закону Дальтона, давление смеси равно сумме парциальных давлений:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_{n-1} + p_n = \sum p_i, \quad (3.1)$$

где  $p$  – давление смеси газов,

$p_1, p_2, p_3, \dots, p_{n-1}, p_n$  – парциальные давления газов, входящих в состав смеси.

Состав смеси может быть задан массовыми или объемными долями. Для любого  $i$  –го газа массовая доля равна:

$$g_i = \frac{m_i}{m}, \quad (3.2)$$

где  $m_i$  – масса  $i$  –го газа,

$m$  – масса смеси.

$$\text{Всегда:} \quad \sum g_i = 1 \quad (3.3)$$

Объемный состав смеси будет определяться объемными долями компонентов, то есть для  $i$  –го компонента:

$$r_i = \frac{V_i}{V}, \quad (3.4)$$

где  $V_i$  – объем  $i$ -го компонента,

$V$  – объем смеси.

$$\text{Всегда:} \quad \sum r_i = 1 \quad (3.5)$$

Мольный состав смеси одинаков с объемным:

$$n_i = \frac{M_i}{M} = r_i, \quad (3.6)$$

где  $M_i$  – число молей  $i$ -го компонента,

$M$  – число молей всей смеси.

Если задан объемный или мольный состав смеси, то кажущийся молекулярный вес ее определяется по формуле:

$$\mu = \sum r_i \cdot \mu_i = \sum n_i \cdot \mu_i. \quad (3.7)$$

Также определяется плотность смеси:

$$\rho = \sum r_i \cdot \rho_i = \sum n_i \cdot \rho_i \quad (3.8)$$

после этого можно определить газовую постоянную смеси, а именно:

$$R = \frac{8314}{\mu}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}. \quad (3.9)$$

Парциальные давления определяются уравнением:

$$p_i = r_i \cdot p = n_i \cdot p. \quad (3.10)$$



Если смесь задана массовым составом, то сразу определяется газовая постоянная по уравнению:

$$R = \sum g_i \cdot R_i, \quad (3.11)$$

А после этого находят кажущийся молекулярный вес:

$$\mu = \frac{8314}{R}, \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}. \quad (3.12)$$

Парциальные давления компонентов определяются по формуле:

$$p_i = g_i \cdot \frac{R_i}{R} \cdot p. \quad (3.13)$$

В случае необходимости пересчет газовой смеси из объемного состава в массовый и обратно ведется по формулам:

$$r_i = \frac{g_i \cdot \mu}{\mu_i}, \quad (3.14)$$

$$g_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\mu}. \quad (3.15)$$

**Пример 1.** Массовый состав газовой смеси следующий:  $\text{H}_2$  – 4%,  $\text{CH}_4$  – 40%,  $\text{C}_2\text{H}_2$  – 20%,  $\text{CO}_2$  – 12%,  $\text{N}_2$  – 24%. Определить газовую постоянную, молекулярный вес, плотность, удельный объем смеси и парциальные давления компонентов. Давление смеси 1,5 бар, температура 27°C. Определить объемный состав смеси.

*Решение:*

Определим газовую постоянную по уравнению (3.11):

$$R = \left( \frac{0,04}{2} + \frac{0,4}{16} + \frac{0,2}{28} + \frac{0,12}{44} + \frac{0,24}{28} \right) \cdot 8314 = 527,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

По формуле (3.12) определим молекулярный вес смеси:

$$\mu = \frac{8314}{R} = \frac{8314}{527,5} = 15,76 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Плотность смеси при нормальных физических условиях по формуле (2.6):

$$\rho_0 = 0,704 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

при заданных условиях по формуле (2.4):

$$\rho = 0,95 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Удельный объем равен:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,95} = 1,053 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Парциальные давления определим по формуле (3.13):

$$p_{H_2} = \frac{0,04 \cdot 8314}{2 \cdot 527,5} \cdot 1,5 \cdot 10^5 = 0,473 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$p_{CH_4} = 0,591 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad p_{C_2H_2} = 0,169 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$p_{CO_2} = 0,064 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad p_{N_2} = 0,203 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Объемный состав смеси определим по формуле (3.14):

$$r_{H_2} = 0,315; \quad r_{CH_4} = 0,349; \quad r_{C_2H_2} = 0,113;$$

$$r_{CO_2} = 0,043; \quad r_{N_2} = 0,135.$$

#### ***IV. Теплоемкость.***

Теплоемкостью тела (системы тел) – называется отношение количества теплоты, поглощенной телом в определенном термодинамическом процессе, к изменению его температуры. Средняя теплоемкость тела определяется по формуле:

$$C_{cp} = \frac{q}{t_1 - t_2} \frac{\text{Дж}}{\text{град}}, \quad (4.1)$$

где  $q$  – теплота,

$t_1, t_2$  – температура начала и конца процесса соответственно.

В зависимости от количественной единицы тепла, к которому подводится теплота в термодинамике, различают массовую, объемную и мольную теплоемкости.

Средняя молярная теплоемкость в произвольном диапазоне температур определяется по формуле:

$$\mu_{p_{cp}} = \frac{\mu_p \cdot t_2 - \mu_p \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{град} \quad (4.2)$$

где  $\mu_{p_{cp}}$  - средняя молярная теплоемкость в произвольном диапазоне температур от  $t_1$  до  $t_2$  °С,

$\mu_p$ ,  $\mu_p$  - средняя молярная теплоемкость в интервалах температур от 0 до  $t_2$  °С и от 0 до  $t_1$  °С соответственно, (выбирается из таблицы),

$t_1, t_2$  – температура начала и конца процесса, °С.

Массовая теплоемкость (удельная теплоемкость) – теплоемкость, отнесенная к единице массы рабочего тела, определяется следующим образом:

$$c_{p_{cp}} = \frac{\mu_{p_{cp}}}{\mu}, \text{ кДж} / \text{кг} \cdot \text{град}, \quad (4.3)$$

где  $\mu$  - молекулярный масса газа, кг/кмоль.

Объемная теплоемкость – теплоемкость, отнесенная к единице объема рабочего тела, определяется по формуле:

$$C_{p_{cp}} = \frac{\mu_{p_{cp}}}{22,4}, \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{град}, \quad (4.4)$$

где 22,4 м<sup>3</sup>/моль – объем одного моля газа при нормальных физических условиях ( $p = 760$  мм рт. ст.,  $t = 0^\circ\text{C}$ ).

В термодинамике широко используется: теплоемкость при постоянном объеме и теплоемкость при постоянном давлении.

Теплоемкости процессов при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$  связаны между собой следующими соотношениями:

$$\text{а) мольные: } \mu c_p - \mu c_v = 8,314, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}, \quad (4.5)$$

$$\text{б) массовые: } c_p - c_v = R, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}, \quad (4.6)$$

где  $R$  – газовая постоянная, кДж/кг·град;

$$\text{в) объемные: } C_p - C_v = 0,37 = \rho_H \cdot R, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}, \quad (4.7)$$

где  $\rho_H$  – плотность при нормальных физических условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Теплоемкости смеси определяют по формулам:

$$\text{а) мольную: } \mu c_{см} = \sum r_i \cdot \mu c_i, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}, \quad (4.8)$$

$$\text{б) массовую: } c_{см} = \sum g_i \cdot c_i, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}, \quad (4.9)$$

$$\text{в) объемную: } C_{см} = \sum r_i \cdot C_i, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}. \quad (4.10)$$

Затраты тепла на нагревание и охлаждение рабочих тел определяются по следующим формулам:

$$\text{а) для } M \text{ молей: } Q = M \cdot \mu c_{cp} \cdot (t_2 - t_1), \text{кДж} \quad (4.11)$$

$$\text{б) для } G \text{ кг: } Q = G \cdot c_{cp} \cdot (t_2 - t_1), \text{кДж} \quad (4.12)$$

$$\text{в) для } V \text{ м}^3: Q = V \cdot C_{cp} \cdot (t_2 - t_1), \text{кДж} \quad (4.13)$$

**Пример 1.** Определить средние мольную, объемную и массовую теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме в интервале температур от 0 до 1300 °С для смеси газов, имеющей следующий объемный состав: CO<sub>2</sub> – 8%, CO – 2%, N<sub>2</sub> – 85%, H<sub>2</sub> – 5%.

*Решение:*

Определим среднюю мольную теплоемкость смеси при постоянном давлении по формуле 4.8 (теплоемкости газов выбираем из приложения 1):

$$\mu_{p_{см}} = \mu_{p_{CO_2}} \cdot r_{CO_2} + \mu_{p_{H_2}} \cdot r_{H_2} + \mu_{p_{CO}} \cdot r_{CO} + \mu_{p_{N_2}} \cdot r_{N_2}$$

$$\mu_{p_{см}} = 51,329 \cdot 0,08 + 30,292 \cdot 0,05 + 32,431 \cdot 0,02 + 31,946 \cdot 0,85$$

$$\mu_{p_{см}} = 33,2 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{град}.$$

Средняя мольная теплоемкость смеси при постоянном объеме (по формуле 4.5) будет равна

$$\mu_v = \mu_p - 8,314 = 24,886 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{град}.$$

Определим средние объемные теплоемкости смеси:

1) при постоянном давлении:

$$C_{p_{см} \text{ ср}} = \frac{\mu_{p_{см}}}{22,4} = \frac{33,2}{22,4} = 1,49 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{град},$$

2) при постоянном объеме:

$$C_{v_{см} \text{ ср}} = \frac{\mu_{v_{см}}}{22,4} = \frac{24,886}{22,4} \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{град}.$$

Средние массовые теплоемкости смеси  
при постоянном давлении:

$$c_{p, см} = \frac{\mu_{ср} c_{p, см}}{\mu_{см}} = \frac{33,2}{27,98} = 1,18 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot \text{град},$$

при постоянном объеме:

$$c_{v, см} = \frac{\mu_{ср} c_{v, см}}{\mu_{см}} = \frac{24,886}{27,98} = 0,889 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot \text{град},$$

где  $\mu_{см}$  - молекулярная масса смеси, кг/кмоль.

Молекулярную массу смеси найдем по формуле 3.7:

$$\mu_{см} = 0,08 \cdot 44 + 0,05 \cdot 2 + 0,02 \cdot 28 + 0,85 \cdot 28 = 27,98 \text{ кг} / \text{кмоль}.$$

**Пример 2.** В закрытом резервуаре объемом 100 литров находится воздух при температуре 0°C и давлении 760 мм рт.ст. Определить тепло, затраченное на нагревание этого воздуха до 200 °C.

*Решение:*

По условию задачи резервуар заполнен воздухом. Воздух представляет собой смесь газов на 21% состоящую из O<sub>2</sub> и на 79% из N<sub>2</sub>.

Определим среднюю мольную теплоемкость воздуха при постоянном давлении в интервале температур от 0 до 200 °C:

$$\mu_{ср} c_{p, см} = 29,936 \cdot 0,21 + 29,136 \cdot 0,79 = 29,414 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{град}.$$

Через соотношение 4.5 найдем значение мольной теплоемкости воздуха при постоянном объеме:

$$\mu_{ср} c_{v, см} = \mu_{ср} c_{p, см} - 8,314 = 29,414 - 8,314 = 21,1 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{град}.$$

По условию задачи объем постоянен, то есть процесс – изохорный и затраты тепла на нагрев будем определять по формуле 4.13, подставляя значение средней объемной теплоемкости в процессе при постоянном объеме.

Среднюю объемную теплоемкость при постоянном объеме найдем по формуле 4.4:

$$C_{v_{cp}} = \frac{\mu c_v}{22,4} = \frac{21,1}{22,4} = 0,94 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{град}.$$

Тогда тепло, затраченное на нагрев, будет равно:

$$Q = V \cdot C_{v_{cm}} \cdot (t_2 - t_1) = 0,1 \cdot 0,94 \cdot (200 - 0) = 18,8 \text{ кДж}.$$

## V. Первый закон термодинамики.

Первый закон термодинамики для 1 кг вещества записывается следующим образом:

$$du = dq - dl. \quad (5.1)$$

Для конечного процесса:

$$\Delta u = q - l, \quad (5.2)$$

где  $\Delta u$  – изменение внутренней энергии, кДж/кг;

$q$  – количество теплоты («+» при подводе и «-» при отводе теплоты от системы) кДж/кг;

$l$  – работа процесса (при расширении «+», при сжатии «-») кДж/кг.

Внутренняя энергия идеального газа определяется по формуле:

$$du = C_v dT, \quad (5.3)$$

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT = C_v \cdot (T_2 - T_1), \quad (5.4)$$

где  $C_v$  – средняя изохорная теплоемкость в интервале температур  $T_2 \div T_1$ .

Количество теплоты:

$$q = C \cdot (T_2 - T_1). \quad (5.5)$$

Работа процесса всегда может быть вычислена, если известна зависимость давления от объема в ходе процесса (уравнение процесса):

$$l = \int_1^2 dl = \int_{v_1}^{v_2} p dv, \text{ Дж} / \text{кг}. \quad (5.7)$$

Первый закон термодинамики через энтальпию:

$$di = dq + vdp, \quad (5.8)$$

где  $vdp = dl_0$  - располагаемая работа,

$di$  - энтальпия.

Энтальпия идеального газа зависит от температуры:

$$di = C_p dT, \quad (5.9)$$

$$\Delta i = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = C_p \cdot (T_2 - T_1) \text{ кДж/кг} \quad (5.10)$$

где  $C_p$  - средняя в интервале температур  $T_2 \div T_1$  изобарная теплоемкость газа.

### ***Изохорный процесс ( $v=\text{const}$ ).***

Уравнение изохорного процесса имеет вид

$$p = \frac{R}{v} \cdot T. \quad (5.11)$$

Для данного процесса справедливо следующее равенство:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (5.12)$$

Тепло, участвующее в процессе идет на изменение внутренней энергии газа:

$$q = \Delta u = C_v (T_2 - T_1) \text{ кДж/кг}. \quad (5.13)$$

Работа, совершаемая газом при изохорном процессе равна нулю ( $l=0$ ).

Располагаемая работа:

$$l_0 = v(p_1 - p_2) \text{ Дж/кг}. \quad (5.14)$$

### ***Изобарный процесс ( $p=\text{const}$ ).***

Уравнение процесса:

$$v = \frac{R}{p} \cdot T \quad \text{или} \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (5.15)$$

Работа при изобарном процессе определяется по формуле:



$$l = p \cdot \int_{v_1}^{v_2} dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (5.16)$$

Располагаемая работа процесса равна нулю ( $l_0 = 0$ ).

Тепло процесса равно изменению энтальпии:

$$q = \Delta i = C_p (T_2 - T_1) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (5.17)$$

### ***Изотермический процесс ( $T = \text{const}$ ).***

Уравнение процесса:

$$pv = RT = \text{const}, \quad (5.18)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (5.19)$$

Внутренняя энергия и энтальпия в изотермическом процессе не изменяются:  $\Delta u = 0$ ,  $\Delta i = 0$ .

Тепло процесса равно работе процесса:

$$q = l = RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (5.20)$$

Располагаемая работа равна работе процесса:  $l_0 = l$ .

### ***Адиабатный процесс ( $dq = 0$ ).***

Уравнение процесса:

$$pv^k = \text{const}, \quad (5.21)$$

где  $k = \frac{c_p}{c_v} > 1$  – показатель адиабаты.

Для адиабатного процесса имеют место следующие соотношения:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k, \quad (5.22)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}, \quad (5.23)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/k}, \quad (5.24)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5.25)$$

При адиабатном процессе изменение внутренней энергии, взятое с обратным знаком равно работе процесса:

$$-\Delta u = l = c_v(T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{p_1 v_1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}\right].$$

Располагаемая работа в  $k$  раз больше работы процесса:

$$l_0 = kl.$$

### ***Политропный процесс.***

Уравнение политропного процесса имеет следующий вид:

$$pv^n = const, \quad (5.26)$$

где  $n$  – показатель политропы, который для разных процессов может иметь любое значение, но остается постоянным в данном процессе.

Для политропного процесса можно записать следующие соотношения:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n, \quad (5.27)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}, \quad (5.28)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/n}, \quad (5.29)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (5.30)$$

Работу политропного процесса можно вычислить по формуле:

$$l = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{p_1 v_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right] = \frac{p_1 v_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right].$$

Располагаемая работа в  $k$  раз больше работы процесса:

$$q = c_n(T_2 - T_1), \quad (5.32)$$

где  $c_n = c_v \cdot \frac{k-n}{1-n}$  – теплоемкость политропного процесса.

Показатель политропы может быть найден как тангенс угла наклона линии политропного процесса в координатах  $\lg p - \lg v$ , взятый с обратным знаком, или по формулам:

$$n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}, \quad (5.33)$$

$$n = \frac{\lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\lg\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}, \quad (5.34)$$

**Пример 1.** Каковы работа расширения и увеличения внутренней энергии 1 кг ртути, испаряемой при постоянном внешнем давлении 3,98 бар, если для испарения необходимо подвести 293 кДж/кг тепла, а удельные объемы жидкой ртути и ее пара при температуре кипения соответственно равны  $0,0798 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг и 0,0756 м<sup>3</sup>/кг.

*Решение:*

По условию задачи процесс изобарный следовательно работу можем определить по формуле (5.16):

$$\begin{aligned} l &= p(v_2 - v_1) = 3,98 \cdot 10^5 \cdot (0,0756 - 0,0798 \cdot 10^{-4}) \\ &= 30,086 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \end{aligned}$$

Изменение внутренней энергии найдем из уравнения первого закона термодинамики, по формуле (5.2):

$$\Delta u = q - l = 293 \cdot 10^3 - 30,086 \cdot 10^3 = 262,914 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

**Пример 2.** До какого давления следует заряжать пусковой баллон ДВС продуктами сгорания из цилиндра двигателя, если температура в баллоне при зарядке 420 К, а после остывания до температуры 288 К давление должно быть 32 бар? Определить количество тепла, теряемое газами при охлаждении, если объем бал-

лона 90 л, теплоемкость продуктов сгорания 0,732 кДж/кг\*град, газовая постоянная  $R=280$  Дж/кг\* град.

Решение:

По условию задачи процесс изохорный следовательно можно воспользоваться соотношением (5.12):

$$p_1 = p_2 \frac{T_1}{T_2} = 32 \cdot 10^5 \cdot \frac{420}{288} = 46,7 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Для того, чтобы определить количество теплоты воспользуемся формулой:

$$Q = mc_v(T_2 - T_1),$$

где  $m$  - масса газов, определяется из формулы (2.2)

$$m = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{32 \cdot 10^5 \cdot 90 \cdot 10^{-3}}{280 \cdot 288} = 3,57 \text{ кг.}$$

Таким образом,

$$Q = mc_v(T_2 - T_1) = 3,57 \cdot 0,732 \cdot (288 - 420) = -345 \text{ кДж.}$$

**Пример 3.** Определить минимально необходимую степень сжатия  $E = \frac{V_1}{V_2}$  в ДВС, чтобы топливо, впрыснутое в цилиндр в конце хода сжатия, воспламенилось. Температура воспламенения топлива 970 К, температура воздуха перед сжатием 300 К. Сжатие считать адиабатным. Каково будет давление в конце сжатия, если начальное давление составляет 0,91 бар.

Решение:

Так как по условию задачи процесс адиабатный, необходимо определить показатель адиабаты.

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\mu c_3}{\mu c_3 - 8,314} = \frac{30,72}{30,72 - 8,314} = 1,4.$$

Из соотношения (5.25) определим конечное давление:

$$p_2 = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot p_1 = \left(\frac{970}{300}\right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} \cdot 0,91 \cdot 10^5 = 54,88 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Для определения минимально необходимой степени сжатия воспользуемся соотношением (5.23):

$$E = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{970}{300}\right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 18,8.$$

## VI. Второй закон термодинамики. Энтропия.

Второй закон термодинамики нередко называют законом возрастания энтропии, и записывается он следующим образом:

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \text{ или } dS \geq 0 \text{ при } dQ = 0. \quad (6.1)$$

В обеих предыдущих формулах знак  $>$  относится к необратимым процессам, а знак равенства - к обратимым.

Так как в случае обратимых процессов  $dS_i = 0$ , а  $dS = dQ/T$ , то с учетом  $dU = dQ - pdv$  имеем:

$$TdS = dU + pdv. \quad (6.2)$$

Уравнение (6.2) называют объединенным уравнением первого и второго законов термодинамики для обратимых процессов.

### Общие формулы для вычисления энтропии.

#### Политропный процесс:

$$s_2 - s_1 = c_v(k - n) \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (6.3)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \left(\frac{k-n}{n}\right) \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (6.4)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \left(\frac{k-n}{n-1}\right) \cdot \ln \frac{T_1}{T_2}. \quad (6.5)$$

**Изохорный процесс:**

$$s_2 - s_1 = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (6.6)$$

**Изобарный процесс:**

$$s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (6.7)$$

**Изотермный процесс:**

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (6.8)$$

**Адиабатный процесс:**

$$s_2 - s_1 = 0, S = const. \quad (6.9)$$

Для определения относительной энтропии принимают  $S_0 = 0$  при нормальных физических условиях и тогда энтропию газа определяют по формулам:

$$s = c_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{v}{v_0}, \quad (6.10)$$

$$s = c_p \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{p}{p_0}, \quad (6.11)$$

Значения  $c_p$ ,  $c_v$ ,  $v_0$ ,  $R$  в нижеприведенных задачах принимают постоянными и берут из таблиц.

**Пример 1.** Найти значение энтропии 1кг кислорода при давлении 2 бар и температуре 80 °С.

Решение:

Энтропию для 1 кг кислорода при заданных условиях найдем по формуле (6.11).

Из справочных таблиц найдем значение массовой теплоемкости для кислорода (0,915 кДж/кг\*град). Далее найдем газовую постоянную кислорода:

$$R = \frac{8314,3}{\mu} = \frac{8314,3}{32} = 259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Тогда по формуле (6.11), зная, что  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C} = 353\text{ K}$ ,  $p = 2 \cdot 10^5\text{ Па}$ ,  $p_0 = 760\text{ мм рт. ст.} = 760 \cdot 133\text{ Па}$ ,  $m = 1\text{ кг}$ .

$$s = 0,915 \cdot 10^3 \cdot \ln \frac{353}{273} - 259,8 \cdot \ln \frac{2 \cdot 10^5}{760 \cdot 133} = 57,86 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

**Пример 2.** К 4 кг азота по изохоре подведено 300 кДж теплоты. Начальное состояние газа определяется давлением 4 бар и температурой 20 °С. Определить объем баллона, в котором находится газ, изменение энтропии, конечные температуру и давление.

Решение:

Из уравнения состояния идеального газа

$$p_1 V = m_{N_2} R T_1 = m_{N_2} \cdot \frac{8313,3}{\mu_{N_2}} \cdot T_1,$$

Определяем объем баллона

$$V = \frac{m_{N_2} \cdot 8313,3 \cdot T_1}{\mu_{N_2} \cdot p_1} = \frac{4 \cdot 8314,3 \cdot 293}{28 \cdot 4 \cdot 10^5} = 0,87\text{ м}^3.$$

Для изохорного процесса можно записать  $Q = m c_v (T_2 - T_1)$ , откуда

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{m_{N_2} \cdot c_v},$$

при  $c_v = 0,742\text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$ .

$$T_2 = 293 + \frac{300 \cdot 10^3}{4 \cdot 0,742 \cdot 10^3} = 394,1\text{ К}.$$

Конечное давление найдем из соотношения для изохорного процесса

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

$$\text{Таким образом, } p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 4 \cdot 10^5 \cdot \frac{394,1}{293} = 5,38 \cdot 10^5\text{ Па}.$$

Изменение энтропии для изохорного процесса определяется по формуле (6.6):

$$\Delta s = 0,742 \cdot 10^3 \cdot \ln \frac{5,38 \cdot 10^5}{4 \cdot 10^5} = 0,2199 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$$

так как в процессе участвует 4 кг азота, то изменение энтропии

$$\Delta S = m_{N_2} \cdot \Delta s = 4 \cdot 0,2199 = 0,8796 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

**Пример 3.** Определить энтропию 1 кг газовой смеси, состоящей из азота и аргона, при  $p_1=0,3$  МПа и  $t=300$  °С. Массовые доли азота и аргона 0,37 и 0,63 соответственно. Газы считать идеальными. Принять, что при  $p_0=0,1$  МПа и  $t_0=0$  °С энтропия азота и аргона равна нулю.

Решение:

Энтропия смеси газов равна сумме энтропий отдельных газов и энтропии смешения, то есть

$$s = s_{N_2} + s_{Ar} + \Delta s.$$

Энтропия 0,37 кг азота, отнесенная к 1 кг смеси равна:

$$s_{N_2} = \left( s_1 - s_0 - R \ln \frac{p_1}{p_0} \right) \cdot g_{N_2},$$

где  $s_1-s_0$  – изменение энтропии азота в зависимости от температуры. По формуле (6.11)

$$\begin{aligned} s_{N_2} &= \left( c_p \ln \frac{T_1}{273} - R \ln \frac{p_1}{p_0} \right) \cdot g_{N_2} = \\ &= \left( 1,0461 \cdot \ln \frac{573}{273} - \frac{8,314}{28} \cdot \ln \frac{0,3}{0,1} \right) \cdot 0,37 = 0,166 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}. \end{aligned}$$

Следовательно, энтропия 0,63 кг аргона, также отнесенная к 1 кг равна:

$$\begin{aligned} s_{Ar} &= \left( c_p \ln \frac{T_1}{273} - R \ln \frac{p_1}{p_0} \right) \cdot g_{Ar} = \\ &= \left( 0,52 \cdot \ln \frac{573}{273} - \frac{8,314}{39,9} \cdot \ln \frac{0,3}{0,1} \right) \cdot 0,63 = 0,099 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}. \end{aligned}$$



Энтропия смешения на 1 кг смеси рассчитывается по формуле:

$$\Delta s = g_{Ar} \cdot R_{Ar} \cdot \ln \frac{1}{r_{Ar}} + g_{N_2} \cdot R_{N_2} \cdot \ln \frac{1}{r_{N_2}},$$

где  $r_i = g_i \frac{\mu_{см}}{\mu_i}$ ,  $\mu_{см} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}$ .

$$\mu_{см} = \frac{1}{\frac{0,37}{28} + \frac{0,63}{39,9}} = 34,48 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

$$r_{N_2} = 0,37 \frac{34,48}{28} = 0,46; \quad r_{Ar} = 0,63 \frac{34,48}{39,9} = 0,54.$$

Тогда энтропия смешения

$$\Delta s = 0,63 \cdot \frac{8,314}{39,9} \cdot \ln \frac{1}{0,54} + 0,37 \cdot \frac{8,314}{28} \cdot \ln \frac{1}{0,46} = 0,166 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Энтропия 1 кг смеси при заданных параметрах:

$$s = s_{N_2} + s_{Ar} + \Delta s = 0,166 + 0,099 + 0,166 = 0,431 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

***Задачи для самостоятельного решения.***

***Уравнение состояния идеального газа.***

1. Газовая постоянная этана  $C_2H_6$  равна 277,6 Дж/кг\*град. Определить молекулярную массу газа, его плотность, удельный объем при нормальных физических условиях.

2. В баллоне емкостью 40 л находится кислород при давлении 112 атм по манометру. Температура кислорода 37 °С, атмосферное давление 736 мм рт. ст. определить массу кислорода и его плотность.

3. В резервуаре емкостью 12 м<sup>3</sup>, содержащем в себе воздух для пневматических работ, давление равно 8 атм по манометру при температуре воздуха 22 °С. После использования части воздуха для работ его давление упало до 4 атм, а температура 17 °С. Определить сколько воздуха израсходовано. Барометрическое давление 1 атм.

4. Баллон, содержащий в себе кислород при давлении 118 атм по манометру и температуре -8 °С, перенесен в помещение с температурой 28 °С. Какое давление будет в баллоне, если газ нагреется до этой температуры. Атмосферное давление равно 1 кгс/см<sup>2</sup>.

5. Предельно допустимое давление газа в баллоне во избежание взрыва равно 150 кгс/см<sup>2</sup>. В этом баллоне газ находится под давлением 135 кгс/см<sup>2</sup> и температуре 18 °С. До какой температуры допустим нагрев газа?

6. В жидкостно-ракетном двигателе объемное соотношение компонентов топлива горючее-окислитель равно 1:3. Бак, содержащий горючее имеет объем 0,3 м<sup>3</sup>. Подача топлива в камеру сгорания ЖРД осуществляется газобаллонным способом. Давление азота, вытесняющего компоненты равно 25 атм. Определить необходимый объем баллона для азота и количество азота при начальном давлении 300 атм, если должно быть осуществлено полное опорожнение топливных баков; начальная температура азота 20 °С, к концу работы двигателя температура снижается до -10 °С.

7. Компрессор подает кислород в резервную емкость объемом 3 м<sup>3</sup>; избыточное давление в резервуаре увеличивается при этом от 0,01 до 0,6 МПа, а температура газа – от 15 до 30 °С. Определить массу поданного компрессором кислорода. Барометрическое давление 747 мм рт. ст.

8. Начальное состояние азота задано параметрами:  $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $v=1,9\text{ м}^3/\text{кг}$ . Азот нагревается при постоянном давлении, причем объем азота увеличивается до  $5,7\text{ м}^3/\text{кг}$ . Определить конечную температуру азота.

### ***Газовые смеси.***

9. Определить массовый и объемный составы смеси водорода с азотом, если газовая постоянная смеси равна  $922\text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$ . Давление смеси  $720\text{ мм рт. ст.}$  определить также парциальные давления компонентов.

10. В резервуаре емкость  $10\text{ м}^3$  под давлением  $1,6\text{ бар}$  находится газовая смесь состоящая из  $8\text{ кг}$  азота,  $6\text{ кг}$  кислорода и некоторого количества углекислоты; температура смеси  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить количество углекислоты; парциальные давления компонентов, объемный состав смеси, среднюю молекулярную массу и газовую постоянную.

11. Так называемый «водяной газ», получаемый в газогенераторе, имеет следующий объемный состав:  $\text{H}_2 - 50\%$ ,  $\text{CO} - 37\%$ ,  $\text{CO}_2 - 6,8\%$ ,  $\text{N}_2 - 5,5\%$ ,  $\text{O}_2 - 0,7\%$ . При сжигании этого газа в газовых горелках на  $1\text{ м}^3$  газа (при нормальных физических условиях) расходуется  $4\text{ кг}$  воздуха. Определить состав горючей смеси, ее молекулярную массу и газовую постоянную; найти плотность и парциальные давления компонентов, если эта смесь подводится к горелкам при температуре  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  и манометрическом давлении  $300\text{ мм вод. ст.}$  Атмосферное давление равно  $740\text{ мм рт. ст.}$

12. В газгольдер постоянного давления водяной газ накачивается компрессором при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После 40 минут работы колокол газгольдера поднялся на  $4,8\text{ м}$ . Масса колокола  $15\text{ тонн}$ , а диаметр  $10\text{ м}$ . Состав водяного газа дан в предыдущей задаче; атмосферное давление равно  $755\text{ мм рт. ст.}$  Определить часовую производительность компрессора в  $\text{кг}$  и в  $\text{м}^3$  при нормальных условиях.

### ***Теплоемкости газов.***

13. Смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода называют гремучим газом. Определить газовую постоянную гремучего газа; мольную, массовую и объемную теплоемкости смеси при постоянном давлении в диапазоне температур от 0 °С до 100 °С.

14. Газовая смесь, состоящая из водорода и метана, в количестве 67,2 м<sup>3</sup>, имеет газовую постоянную  $R_{см}=2550$  Дж/кг\*град; давление смеси 0,98 бар; температура 15 °С. Определить массовые и объемные доли, массу водорода и метана в смеси, мольную теплоемкость водорода в диапазоне температур от 100 °С до 1500 °С при постоянном давлении.

15. Воздух в количестве 800 м<sup>3</sup> при температуре 200 °С при постоянном давлении 1,5 бар. Определить среднюю теплоемкость и количество теплоты, выделенной при охлаждении.

### ***Первый закон термодинамики.***

16. На сжатие 3 кг метана затрачено 800 кДж работы, при этом внутренняя энергия газа увеличилась на 595 кДж. Определить количество тепла и указать подводится оно или отводится; определить изменение температуры и энтальпии газа, если мольная теплоемкость метана при постоянном объеме равна 26,48 кДж/кмоль\*град.

17. Двигатель внутреннего сгорания приводит в движение генератор, который отдает в сеть ток силой 225 А при напряжении 110 В. КПД генератора 0,95. Определить КПД двигателя, если он потребляет в час 7 кг топлива, имеющего теплотворную способность 42,3 МДж/кг.

18. В калориметрической бомбе емкостью 300 см<sup>3</sup>, заполненной кислородом при давлении 25 бар и температуре 293 К, сгорает 0,3 г топлива, имеющего теплотворную способность 25100 кДж/кг. Определить повышение давления и температуру в конце сгорания, пренебрегая теплоотдачей к стенкам бомбы.

19. Шарообразный газгольдер диаметром 8 м заполнен метаном при давлении 1,5 бар и температуре 273 К. Определить повышение давления в газгольдере и изменение внутренней энергии

газа, когда в результате нагрева солнечными лучами температура газа повысится до 293 К. Мольная теплоемкость метана при постоянном давлении 34,7 кДж/кмоль\*град.

20. Определить количество тепла, полученное водородом в баллоне емкостью 40 л, и изменение его температуры, внутренней энергии и энтальпии, если избыточное давление в результате нагревания баллона повысилось с 140,3 бар до 152 бар. Барометрическое давление 743 мм рт. ст., теплоемкость водорода 14,05 кДж/кг\* град, начальная температура 290 К.

21. К концу хода сжатия объем рабочей смеси в цилиндре двигателя автомобиля «Волга» составляет  $109 \text{ см}^3$ , температура 645 К, давление 13 бар. Определить теоретическую температуру и давление после сгорания смеси, считая, что горение происходит мгновенно, а физические свойства смеси такие же, как у воздуха. Количество сгорающего топлива 19 мг, его *теплотворная* способность 43800 кДж/кг.

22. Под колоколом газгольдера находится 3 кг азот, при начальной температуре 293 К и при постоянном давлении 1,32 бар. Найти увеличение объема газа, совершаемую им работу и повышение его температуры в результате сообщения газу 60 кДж тепла за счет солнечного излучения. Теплоемкость азота 1,03 кДж/кг\* град.

23. Какова должна быть мощность электрического нагревателя сверхзвуковой аэродинамической трубы для подогрева воздуха в количестве 2 кг/с при постоянном давлении от 298 К до 900 К.

24. В камеру сгорания газотурбинного двигателя поступает 41 кг/с воздуха при начальной температуре 490 К и 0,5 кг/с топлива с теплотворной способностью 42000 кДж/кг. Найти повышение удельной внутренней энергии и энтальпии продуктов сгорания и секундную работу расширения, если давление в камере сгорания постоянно и равно 6 бар, а продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

25. В цилиндре ДВС на одном из участков цикла продукты сгорания расширяются при постоянном давлении 64 бар от объема  $39 \text{ см}^3$  до объема  $66 \text{ см}^3$ . Температура в конце этого процесса 2220 К.

Считая, что физические свойства продуктов сгорания такие же, как у воздуха, определить температуру в начале процесса расширения, работу, совершенную на этом участке и количество сгоревшего топлива, если его теплотворная способность  $42200 \text{ кДж/кг}$ , а также изменение удельной внутренней энергии и энтальпии продуктов сгорания.

26. В цилиндре компрессора изотермически сжимается воздух от начального давления  $0,96 \text{ бар}$  до конечного  $3,4 \text{ бар}$ . Определить массу, конечный объем сжимаемого воздуха и работу сжатия, если начальный объем составляет  $4,3 \text{ л}$ , а сжатие производится при температуре  $293 \text{ К}$ .

27. При изотермическом сжатии  $1,3 \text{ кмоль}$  гелия отведено  $3500 \text{ кДж}$  тепла. Определить параметры и объем гелия в начальной и конечной точках процесса и работу сжатия, если сжатие производится при температуре  $303 \text{ К}$  до давления  $6 \text{ бар}$ .

28. Определить работу, затраченную на изотермическое сжатие  $2 \text{ кг}$  азота от давления  $3 \text{ бар}$  до давления  $9,4 \text{ бар}$ , если сжатие производится при температуре  $450 \text{ К}$ . Как изменится эта работа, если понизить температуру газа, поступающего в компрессор, с  $450$  до  $300 \text{ К}$ .

29. При внезапном открывании вентиля на баллоне высокого давления, присоединенного к трубе, другой конец которой закрыт, газ, заключенный в трубе, подвергнется быстрому сжатию, которое можно считать адиабатным. Определить повышение температуры, которое при этом произойдет, если линия заполнена кислородом при давлении  $1,05 \text{ бар}$  и температуре  $300 \text{ К}$ , а давление в баллоне  $150 \text{ бар}$ . Мольная теплоемкость кислорода при постоянном давлении  $33,1 \text{ кДж/кмоль}^\circ\text{град}$ .

30. В цилиндре емкостью  $0,2 \text{ л}$ , закрытом крышкой- поршнем, находится воздух при давлении  $100 \text{ бар}$  и температуре  $293 \text{ К}$ . Определить скорость вылета крышки при ее внезапном освобождении, если масса крышки  $1 \text{ кг}$ , а воздух адиабатно расширяется в  $3$  раза, прежде чем перестает действовать на крышку. Какова будет температура воздуха после вылета крышки.

31. Осевой компрессор газовой турбины всасывает воздух при давлении 1,013 бар и температуре 303 К и подает его в камеру сгорания при давлении 7,3 бар и температуре 640 К. Определить показатель политропы процесса сжатия, его теплоемкость, количество тепла, изменение внутренней энергии, энтальпии и работу сжатия 1 кг воздуха в компрессоре.

32. Для создания в рабочем участке аэродинамической трубы скорости воздуха 770 м/с необходимо осуществить его адиабатное расширение от 12,4 до 1,013 бар. До какой температуры нужно подогревать воздух перед соплом трубы, чтобы его температура в рабочем участке была не менее 278 К.

33. 1 кг водорода и 1 кг кислорода расширяются от давления 5 атм до 1 атм, начальная температура обоих газов одинакова и равна 227 °С. Определить и сравнить адиабатную и изотермную работу расширения этих газов.

34. Смесь из 4 кг кислорода и 6 кг азота адиабатно расширяется до  $V_2=2V_1$ . Начальные параметры смеси: давление 10 бар, температура 127 °С. Определить объем в начале и конце процесса расширения, давление и температуру в конце процесса расширения, работу расширения и изменение внутренней энергии.

35. Продукты сгорания бензина расширяются в ДВС по политропе  $n=1,27$  от 30 до 3 бар. Начальная температура газов 2100 °С; массовый состав продуктов сгорания 1 кг бензина следующий:  $CO_2=3,135$  кг;  $H_2=1,305$  кг;  $O_2=0,34$  кг;  $N_2=12,61$  кг. Определить работу расширения этих газов, если одновременно подается в цилиндр 2 г бензина.

36. 1 кг азота изотермно сжимается до  $v_2=0,5v_1$ , а затем изобарно расширяется до начального объема; начальное состояние определяется температурой 27 °С и давлением 1 бар. Определить работы, изменения внутренней энергии и энтальпии, количества внешней теплоты обоих процессов и суммарное изменение этих величин. Представить эти процессы на  $p-v$ -диаграмме.  $R=297$  Дж/кг\*град, а  $c_p=1,05$  кДж/кг\*град.

37. 1 кг воздуха политропно расширяется от начального давления 12 бар до 2 бар, причем объем его увеличился в 4 раза; начальная температура воздуха 127 °С. Определить показатель политропы, начальный и конечный объемы, конечную температуру и работу расширения.

### **Второй закон термодинамики. Энтропия.**

38. 1 кг азота при температуре 50 °С находится в баллоне емкостью 0,5 м<sup>3</sup>. Найти энтропию.

39. Начальное состояние 1 кмоль азота определяется температурой 10 °С. Как изменится энтропия газа, если его температура повысится на 100 °С в процессах: изохорном, изобарном и адиабатном.

40. 5 кг кислорода изотермно расширяются до  $V_2=3V_1$  а затем изобарно сжимаются до начального объема. Начальное состояние газа определяется давлением 12 бар и температурой 300 °С. Определить параметры газа во всех трех точках, работу, изменение внутренней энергии и энтропии в обоих процессах и суммарно.

41. Определить, насколько увеличится энтропия при смешении 3 кг азота и 2 кг углекислого газа. Газы считать идеальными. Температуры и давления газов до смешения одинаковы.

42. Смесь газов из 70% азота и 30% водорода (по массе) находится при  $t=600$  °С и  $p=0,2$  МПа. Вычислить энтропию 1 кг смеси. Считать, что энтропия обоих компонентов при  $p_0=0,1$  МПа и  $t_0=0$  °С равна нулю. Считать, что между азотом и водородом не происходит химической реакции.

43. Определить энтропию идеальной газовой смеси, находящейся в резервуаре вместимостью 5 м<sup>3</sup> под давлением 800 кПа и состоящей из 10 кг азота, 5 кг кислорода и некоторого количества гелия. Температура смеси равна 250 °С. Считать, что энтропия компонентов при  $p_0=0,1$  МПа и  $t_0=0$  °С равна нулю.

44. Имеется 10 м<sup>3</sup> смеси при нормальных физических условиях с объемным составом: O<sub>2</sub>-20%, CO<sub>2</sub>-30%, N<sub>2</sub>-50%. Давление смеси 5 ат, температура 37 °С. После политропного сжатия давление



поднялось до 10 ат, а температура - до 147 °С. Определить показатель политропы и изменение энтропии смеси. Значение  $\kappa$  принять равным 1,38.

45. Политропный процесс 3 кг кислорода определяется теплоемкостью процесса, равной  $c = -0,35$  кДж/кг\*град. Начальное состояние газа определяется давлением 5 бар и температурой 80 °С. Определить показатель политропы, работу процесса, изменение внутренней энергии и энтропии, если в процессе к газу подведено 105 кДж теплоты.

46. К 5 кг окиси углерода СО при постоянном давлении подведено из вне 600 кДж теплоты. Начальное состояние газа определяется объемом 2 м<sup>3</sup> и температурой 17 °С. Определить давление при котором происходит процесс, конечные объем и температуру, произведенную газом работу и изменение его энтропии.

## *Приложения.*

### Приложение 1.

Внесистемная единица измерения давления	Па
1 бар	$10^5$
1 кгс/см <sup>2</sup>	$9,806 \cdot 10^4$
1 мм рт. ст.	133
1 мм вод. ст.	9,806
1 атм (физическая)=760 мм рт. ст.	$1,01 \cdot 10^5$
1 ат (техническая)	$1,02 \cdot 10^5$

### Приложение 2.

*Молекулярные массы, плотности при нормальных условиях  
некоторых газов.*

Газ	Химическое обозначение	Молекулярная масса, кг/к моль	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Воздух	-	28,97	1,2928
Гелий	He	4,0026	0,1785
Аргон	Ar	39,944	1,7839
Водород	H <sub>2</sub>	2,0159	0,08987
Азот	N <sub>2</sub>	28,0134	1,2505
Кислород	O <sub>2</sub>	31,9986	1,42895
Хлор	Cl <sub>2</sub>	70,906	3,22
Окись углерода	CO	28,009	1,2500
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	44,0079	1,9768
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	64,0658	2,9263
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,0306	0,7714
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,014	(0,804)

**Средняя молярная теплоемкость различных газов**

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух
0	29,2783	29,0228	28,6208	29,1275	35,8650	38,8590	33,5033	29,0773
100	29,5421	29,0521	28,9391	29,1819	38,1179	40,65%	33,7462	29,1568
200	29,9357	29,1359	29,0773	29,3076	40,0650	42,3346	34,1231	29,3034
300	30,4047	29,2908	29,1275	29,5211	41,7609	43,8839	34,5795	29,5253
400	30,8820	29,5044	29,1908	29,7933	43,2558	45,2239	35,0945	29,7933
500	31,3385	29,7682	29,2531	30,1032	44,5790	46,3963	35,6347	30,0990
600	31,7656	30,0487	29,3201	30,4298	45,7599	47,3594	36,2000	30,4088
700	32,1550	30,3460	29,4122	30,7564	46,8193	48,2388	36,7946	30,7271
800	32,5067	30,6392	29,5211	31,0746	47,7698	48,9507	37,3976	31,0328
900	32,8292	30,9281	29,6509	31,3803	48,6240	49,6206	38,0132	31,3259
1000	33,1223	31,2003	29,7933	31,6693	49,3987	50,1650	38,6245	31,6023
1100	33,3903	31,4599	29,9482	31,9414	50,1064	50,6675	39,2317	31,8661
1200	33,6373	31,7111	30,1115	32,1969	50,7471	51,0862	39,8305	32,1131
1300	33,8676	31,9456	30,2916	32,4314	51,3291	—	40,4125	32,3476
1400	34,0812	32,1676	30,4717	32,6575	51,8651	—	40,4820	32,5695
1500	34,2864	32,3769	30,6517	32,8627	52,3550	—	41,5306	32,7789
1600	34,4790	32,5695	30,8360	33,0553	52,8073	—	42,0624	32,9715
1700	34,6632	32,7538	31,0160	33,2357	53,2260	—	42,5816	33,1558
1800	34,8391	32,9213	31,1961	33,4070	53,6112	—	43,0757	33,3233
1900	35,0108	33,0846	31,3761	33,5661	53,9672	—	43,5447	33,4866
2000	35,1741	33,2353	31,5520	33,7127	54,2980		44,0011	33,6457
2100	35,3332	33,3819	31,7279	33,8551	54,6063	-	44,3990	33,7923
2200	35,4882	33,5201	31,8954	33,9849	54,8880	—	44,85%	33,9305
2300	35,6389	33,6457	32,0629	34,1105	55,1522	—	45,2616	34,0644
2400	35,7897	33,6834	32,2262	34,2278	55,3993	.	45,6510	34,1901
2500	35,9320	33,8802	32,3895	34,3408	55,6254	.	46,0237	34,3115
2600	36,0744	-	32,5444	-	.	—	46,3880	—
2700	36,2126	-		-	—	—	46,7355	—
2800	-	-	-	-	-	—	47,0663	—
2900	-	-	-	-	-	-	47,3846	-

По данным М.П. Вукаловича, В.А. Кириллина, В.Н. Тимофеева.

## Домашние задания.

### 1. Газовые смеси и теплоемкости.

Газовая смесь задана следующим образом: в массовых или объемных долях (условия взять из таблицы в соответствии с номером задачи), процентным составом компонентов смеси (графа 1); давление смеси  $p_{см}$  в бар (графа 2), объем смеси  $V_{см}$  в  $м^3$  (графа 3), температура смеси  $t_{см}$  в  $^{\circ}C$  (графа 4).

Определить:

1. состав смеси (если по условию задачи состав смеси задан в объемных долях, то следует определить состав смеси в массовых долях и наоборот).
2. газовые постоянные компонентов  $R_j$  и смеси  $R_{см}$  в  $кДж/кг \cdot K$ .
3. среднюю молярную массу смеси через объемные и массовые доли.
4. парциальные давления компонентов через объемные и массовые доли.
5. массу смеси  $m_{см}$  и компонентов  $m_j$  в кг.
6. парциальные объемы  $V_j$  в  $м^3/кг$  и плотности  $\rho_i$   $кг/м^3$  компонентов.
7. плотности компонентов  $\rho_i$   $кг/м^3$  и смеси  $\rho_{см}$   $кг/м^3$  при заданных условиях  $p_{см}$  и  $T_{см}$ .
8. плотности компонентов и смеси при нормальных физических условиях через объемные и массовые доли.
9. среднюю молярную, объемную и массовые теплоемкости при  $p=const$  и  $v=const$  для температуры смеси  $t_{см}$ .
10. среднюю молярную, объемную и массовые теплоемкости для интервала температур (графа 5).
11. количество теплоты, необходимое на нагревание (охлаждение) в интервале температур (графа 5) при  $p=const$ : количества вещества 2 моль, 5  $м^3$  и 7 кг смеси.

# Исходные данные для домашних заданий

№ задачи	Процентные составы компонентов смеси							Р <sub>см</sub> , бар	V <sub>см</sub> , м <sup>3</sup>	t <sub>см</sub> , °C	Интервал температур
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>				
1*	12	-	-	75	8	-	5	0,95	2	2000	200-1000
2*	10	-	2	80	-	-	8	1,0	3	450	300-100
3*	-	5	15	70	10	-	-	0,9	4	500	100-300
4*	13	-	-	75	6	-	6	1,05	5	150	600-200
5*	-	10	30	50	10	-	-	1,05	6	200	1000-100
6*	5	30	10	55	-	-	-	0,85	7	350	900-200
7*	14	-	-	77	5	-	4	0,7	8	400	700-500
8*	-	5	20	75	-	-	-	0,95	9	100	500-200
9*	-	-	-	60	15	10	15	1,0	10	300	800-300
10*	15	-	-	76	4	-	5	1,05	2	600	600-100
11*	20	-	10	-	15	-	55	1,15	3	700	750-250
12*	16	-	-	76	4	-	4	1,2	4	750	1000-500
13*	8	5	2	85	-	-	-	1,25	5	700	300-1300
14*	15	-	-	75	5	-	5	1,05	6	800	600-900
15*	-	20	10	50	-	-	20	1,85	7	1000	1000-400
16	18	-	1	65	-	16	-	1,2	8	1200	850-350
17	-	15	-	45	15	-	25	1,0	9	1000	350-750
18	14	-	-	76	6	-	4	0,9	10	2000	900-600
19	-	2	25	65	-	8	-	1,0	2	450	450-300
20	-	10	-	70	-	15	5	1,05	3	350	300-150
21	10	-	-	75	5	-	10	1,05	4	600	800-300
22	-	5	10	80	-	-	5	1,0	5	550	400-300
23	17	-	-	74	5	-	4	0,95	6	400	800-300
24	10	10	20	60	-	-	-	1,15	7	100	650-150

										0	
25	-	2	28	55	-	15	-	0,85	8	100 0	150- 1200
26	15	-	-	47	7	-	31	1,0	9	800	300-800
27	-	17	40	13	-	30	-	1,0	10	300	1200- 1000
28	12	-	-	74	5	-	8	0,9	2	500	400-900
29	-	8	15	62	-	15	-	0,95	3	100 0	800-600
30	10	-	-	80	5	-	5	1,0	4	600	600-100

В задачах, отмеченных \*, заданы объемные, в остальных задачах – массовые доли компонентов.

### ***Список использованной литературы***

1. Теплотехника [Текст]: учебник / [авт. кол.: И. Е. Иванов и др.]; под ред. М. Г. Шатрова - Москва: Академия, 2011. - 288 с.
2. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст]: учебное пособие для вузов / [Л. Т. Бахшиева и др.]; под ред. А. А. Захаровой - Москва: Академия, 2008. - 272 с.
3. Вукалович М. П., Кириллин В. А., Ремизов С. А., С и л е ц к и и В. С., Тимофеев В. Н., Термодинамические свойства газов, Машгиз, 1953.
4. Барилович В А Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.А. Барилович, Ю.А. Смирнов. - Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 432 с.: 60х90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат).- В пер. - ISBN 978-5-16-005771-2. - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread.php?book=356818>
5. Бобров Ю. Л. Теплоизоляционные материалы и конструкции [Электронный ресурс]: учебник / Ю.Л. Бобров, Е.Г. Овчаренко, Б.М. Шойхет. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: ИНФРА-М, 2010. - 266 с.: ил. - ISBN 978-5-16-004089-9. - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread.php?book=222143>