

5. Определение скрытой теплоты парообразования.
6. Определение степени сухости и энтальпии влажного насыщенного пара.
7. Исследование работы компрессорной установки.
8. Определение коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате емкостного типа.
9. Определение коэффициента теплопередачи в кожухотрубном пароводяном теплообменнике

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

### Общие методические указания

К решению задач контрольного задания следует приступать только после того, как изучите соответствующий раздел курса. Рекомендуется ознакомиться с ходом решения аналогичных задач по учебной литературе. Следует стараться запомнить примерные значения параметров задачи (исходные и вычислительные): они также содержат полезную информацию.

Контрольные задачи составлены по стовариантной системе, в которой к каждой задаче исходные данные выбираются из соответствующих таблиц по последней и предпоследней цифре шифра (личного номера) студента заочника. Вариант работы должен соответствовать шифру студента. Работа, выполненная не по своему варианту, не рассматривается.

При выполнении контрольных задач необходимо соблюдать следующие условия:

- а) выписать условие задачи и исходные данные;
- б) решение задач сопровождать кратким пояснительным текстом;
- в) вычисления проводить в единицах СИ;
- г) после решения задачи нужно дать краткий анализ полученных результатов и сделать выводы;
- д) в конце контрольной работы должен быть приведен список используемой литературы.

Для заметок рецензента оставлять поля.

### Задача № 1

Смесь газов с начальной температурой  $T_1 = 300$  К сжимается от давления  $p_1 = 0,1$  МПа до давления  $p_2$ . Сжатие может происходить по изотерме, по адиабате и по политропе с показателем политропы  $n$ .

Определить для каждого из трех процессов сжатия конечную температуру  $T_2$  и объем  $v_2$  смеси, изменение внутренней энергии  $\Delta U$ , энтальпии  $\Delta H$  и энтропии смеси  $\Delta S$ , а также теплоту  $Q$  и работу  $L$ . Результаты расчетов занести в таблицу 2 и изобразить процессы сжатия в  $p$ - $v$  и  $T$ - $S$  – диаграммах. Данные, необ-

ходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 1 примечания. Расчет проведе-  
ти, приняв теплоемкость постоянной.

Таблица 1

Послед- няя цифра шифра	Состав смеси	$n$	Предпоследняя цифра шифра	$p_2$ , МПа
0	2 кг O <sub>2</sub> + 8 кг N <sub>2</sub>	1,25	0	0,9
1	5 кг CO <sub>2</sub> + 5 кг CO	1,3	1	1,0
2	3 кг CO + 7 кг O <sub>2</sub>	1,4	2	0,85
3	6 кг N <sub>2</sub> + 4 кг CO <sub>2</sub>	1,5	3	0,8
4	5 кг H <sub>2</sub> O + 5 кг CO <sub>2</sub>	1,4	4	0,95
5	2 кг N <sub>2</sub> + 8 кг H <sub>2</sub>	1,3	5	0,9
6	4 кг CO + 6 кг H <sub>2</sub>	1,2	6	0,85
7	2 кг CO <sub>2</sub> + 8 кг CO	1,1	7	0,9
8	1 кг H <sub>2</sub> + 9 кг N <sub>2</sub>	0,9	8	0,8
9	5 кг N <sub>2</sub> + 5 кг CO <sub>2</sub>	0,8	9	0,7

Таблица 2

Процессы	$V_2$	$T_2$	$\Delta U$	$\Delta H$	$\Delta S$	$Q$	$L$
	м <sup>3</sup>	К	кДж	кДж	кДж/К	кДж	кДж
Изотермический							
Адиабатный $k =$							
Полиτροпный $n =$							

**Методические указания**

Смесь газов можно рассматривать как идеальный газ. Параметры газовой  
смеси рассчитываются по уравнению состояния

$$pV = MRT,$$

где  $p$  – абсолютное давление, Па;  
 $V$  – объем смеси, м<sup>3</sup>;  
 $M$  – масса смеси, кг;  
 $R = 8314/\mu$  – газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К);  
 $T$  – температура, К;  
 $\mu$  – средняя молекулярная масса смеси, кг/кмоль.

При массовом задании смеси  $\mu$  вычисляется по формуле:

$$\mu = \frac{M}{\frac{M_1}{\mu_1} + \frac{M_2}{\mu_2} + \dots},$$

где  $\mu_1, \mu_2$  – молекулярная масса 1 и 2 компонентов;  
 $M_1$  и  $M_2$  – масса 1 и 2 компонентов, (кг).

Для расчета конечных параметров, работы и теплоты процессов используются зависимости, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Тип процесса	Связь параметров	Работа изменения объема, Дж	Внешняя работа, Дж	Теплота, Дж
Изохорный $v = const$	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$W=0$	$L=Mv(p_1-p_2)$	$Q=C_v M(T_2-T_1)$
Изобарный $P = const$	$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$W=Mp(v_2-v_1)$	$L=0$	$Q=C_p M(T_2-T_1)$
Изотермный $T = const$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1}$	$W = MRT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$L = MRT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$Q = MRT \ln \frac{p_1}{p_2}$

Адиабатный $dq = 0$	$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k$ $\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$	$W = \frac{MR}{k-1} (T_1 - T_2)$	$L = kW$	$Q = 0$
Политроп- ный $p v^n = \text{const}$	$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n$ $\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$	$W = \frac{MR}{n-1} (T_1 - T_2)$	$L = nW$	$Q = MC_n (T_2 - T_1)$ $C_n = C_v \frac{n - k}{n - 1}$

Здесь  $M$  – масса участвующего в процессе газа,  $W$  – работа изменения объема,  $L$  – внешняя работа,  $C_n$  – теплоемкость в политропном процессе.

$$k = \frac{C_p}{C_v} - \text{показатель адиабаты.}$$

Изменение внутренней энергии ( $\Delta U$ ) и энтропии ( $\Delta S$ ) для любого процесса при условии постоянной теплоемкости рассчитывается по соотношениям:

$$\Delta U = MC_v (T_2 - T_1),$$

$$\Delta H = MC_p (T_2 - T_1),$$

$$\Delta S = M \left( C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \right),$$

$$\Delta S = M \left( C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \right).$$

Удельная массовая теплоемкость смеси при постоянном давлении при массовом задании смеси может быть рассчитана по формуле

$$C_p = \sum_{i=1}^n \frac{\mu C_{pi} n_i}{M}$$

где  $n_i = \frac{M_i}{\mu_i}$  – число киломолей  $i$ -го компонента смеси;

$\mu C_{pi}$  – мольная теплоемкость при постоянном давлении, значение которой приведено в таблице 1 приложения.

Удельная массовая теплоемкость смеси при постоянном объеме может быть найдена по уравнению Майера

$$C_v = C_p - R.$$

### Пример:

Смесь газов, состоящая из 6 кг азота и 4 кг гелия, с начальной температурой  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  сжимается от давления  $P = 0,1$  МПа до давления  $P = 0,6$  МПа. Сжатие происходит по политропе с показателем  $n = 1,2$ .

Определить конечную температуру  $T_2$ , и объем  $v_2$ , изменение внутренней энергии ( $\Delta U$ ), энтальпии ( $\Delta H$ ), энтропии ( $\Delta S$ ), а также работу ( $L$ ) и теплоту процесса ( $Q$ ).

### Решение:

Молекулярная масса смеси газов

$$\mu = \frac{\frac{M_1 + M_2}{\frac{M_1}{\mu_1} + \frac{M_2}{\mu_2}}} = \frac{6 + 4}{\frac{6}{28} + \frac{4}{4}} = 8,23 \text{ кг/кмоль}.$$

Газовая постоянная смеси:

$$R = \frac{R \mu}{\mu} = \frac{8,314}{8,23} = 1,01 \text{ кДж/кгК}.$$

Азот является двухатомным газом  $\mu C_p = 29,1$  кДж/(кмоль · К), гелий является одноатомным газом  $\mu C_p = 20,8$  кДж/(кмоль · К). (Приложение, таблица 1).

Так как количество киломолей компонентов смеси  $n_i = M_i/\mu_i$ , массовые теплоемкости смеси определяются по формулам:

$$C_p = \sum_{i=1}^2 \frac{\mu C_{pi} n_i}{M} = \frac{29,1 \cdot 6 / 28 + 20,8 \cdot 4 / 4}{10} = 2,68 \text{ кДж/ (кг · К)}.$$

$$C_v = C_p - R = 2,68 - 1,01 = 1,67 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Температура смеси после сжатия

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 300 \left( \frac{0,6}{0,1} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 404 \text{ К.}$$

Конечный объем смеси

$$V_2 = \frac{MRT_2}{P_2} = \frac{10 \cdot 1,01 \cdot 10^3 \cdot 404}{6 \cdot 10^5} = 6,79 \text{ м}^3$$

Изменение внутренней энергии, энтальпии, энтропии

$$\Delta U = C_v M (T_2 - T_1) = 1,67 \cdot 10 \cdot (404 - 300) = 1737 \text{ кДж};$$

$$\Delta H = C_p M (T_2 - T_1) = 2,68 \cdot 10 \cdot (404 - 300) = 2787 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = M \left( C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \right) = 10 \left( 2,68 \ln \frac{404}{300} - 1,01 \ln \frac{0,6}{0,1} \right) = -9,94 \text{ кДж.}$$

Показатель адиабаты смеси газов

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{2,68}{1,67} = 1,6.$$

Теплота и работа процесса

$$Q = MC_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = 10 \cdot 1,67 \frac{1,2-1,6}{1,2-1} (404 - 300) = -3474 \text{ кДж};$$

$$W = \frac{MR}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{10 \cdot 1,009}{1,2-1} (300 - 404) = -5247 \text{ кДж};$$

Изображение процесса сжатия в  $T$ - $S$ - диаграмме представлено на рисунке 1.

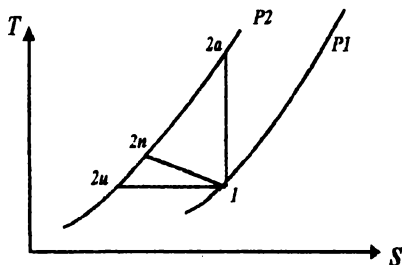


Рис. 1.

Обозначения:  $p_1, p_2$  – изобары начального и конечного состояния газа, соответственно, 1-2a – адиабата, 1-2n – политропа, 1-2u – изотерма.

Значение показателя политропы находится между 1 и  $k = 1,6$ , следовательно, процесс сжатия будет расположен между изотермой 1–2и и адиабатой 1–2а.

**Вывод:** В процессе сжатия смеси газов работа будет затрачиваться, а теплота, несмотря на то, что температура в процессе сжатия растет, отводится.

### Задача № 2

Компрессор, производительностью  $V_1$ , м<sup>3</sup>/час, состоящий из  $m$  ступеней, сжимает газ от давления  $P_1$  до  $P_2$ . Сжатие в ступенях происходит по политропе с показателем  $n$ . Промежуточное давление выбрано оптимально, а охлаждение во всех теплообменниках производится до начальной температуры  $T_1$ , К. Охлаждающая вода, прокачиваемая через рубашки цилиндров и теплообменники, нагревается на  $\Delta t = 13$  °С.

Исходные данные для решения задачи приведены в таблице 4.

Таблица 4

Последняя цифра шифра	Газ	$\mu$ , кг/кмоль	$V_1$ м <sup>3</sup> /час	$n$	$m$ , число ступеней	Предпоследняя цифра шифра	$P_1$ , МПа	$T_1$ , К	$P_2$ , МПа
0	гелий He	4	3000	1,35	3	0	0,12	293	1,92
1	воздух	29	3500	1,28	2	1	0,2	311	3,2
2	азот N <sub>2</sub>	28	4000	1,35	4	2	0,08	272	1,28
3	углекисл. газ CO <sub>2</sub>	44	5000	1,2	3	3	0,14	423	2,24
4	водород H <sub>2</sub>	2	2000	1,21	2	4	0,50	372	8,0
5	кислород O <sub>2</sub>	32	4000	1,31	4	5	0,24	324	3,84
6	окись углерода CO	28	5000	1,25	3	6	0,16	401	2,56
7	метан CH <sub>4</sub>	16	3500	1,19	2	7	0,06	346	0,96
8	азот N <sub>2</sub>	28	6000	1,3	4	8	3	293	48
9	гелий He	4	2500	1,4	3	9	0,04	311	0,64