

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

Найти общую мощность, затрачиваемую на сжатие в компрессоре, и расход охлаждающей воды. Сравнить найденную мощность с мощностью, которая затрачивается на сжатие в одноступенчатом компрессоре с процессом сжатия по политропе с тем же показателем  $n$ . Теплоемкость в расчетах считать постоянной. Перед расчетом изобразить принципиальную схему компрессора, а также процессы сжатия изобразить в  $p-v$  и  $T-S$  – диаграммах.

### Методические указания

Мощность  $N$ , затрачиваемая в одноступенчатом компрессоре, зависит от характера процесса сжатия и равна:

- при изотермическом сжатии

$$N = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1};$$

- при адиабатном сжатии

$$N = \frac{k p_1 V_1}{k - 1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right];$$

- при политропном сжатии

$$N = \frac{n p_1 V_1}{n - 1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right].$$

Количество теплоты, отводимое за 1 секунду от рабочего тела при сжатии в компрессоре, рассчитывается по формулам:

при изотермическом сжатии

$$Q = N;$$

при адиабатическом сжатии

$$Q = 0;$$

при политропном сжатии

$$Q = G C_v \frac{n-k}{n-1} (T_1 - T_2),$$

здесь  $G$  – массовая производительность компрессора.

Для получения газа высокого давления применяют многоступенчатые компрессоры, в которых процесс сжатия осуществляется в нескольких последова-

тельно соединенных цилиндрах с промежуточным охлаждением газа в охладителях.

Степень повышения давления в каждой ступени компрессора выбирается из условия:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = \sqrt[m]{\varepsilon},$$

где  $\varepsilon_1 = \frac{p'}{p_1}$ ,  $\varepsilon_2 = \frac{p''}{p'}$ ,  $\varepsilon_3 = \frac{p'''}{p''}$  – степень сжатия в первой, во второй, в третьей ступени компрессора.

$$\varepsilon = \frac{p_2}{p_1} \text{ – степень сжатия в компрессоре,}$$

$m$  – число ступеней в компрессоре.

Схема такого трехступенчатого компрессора представлена на рисунке 2.

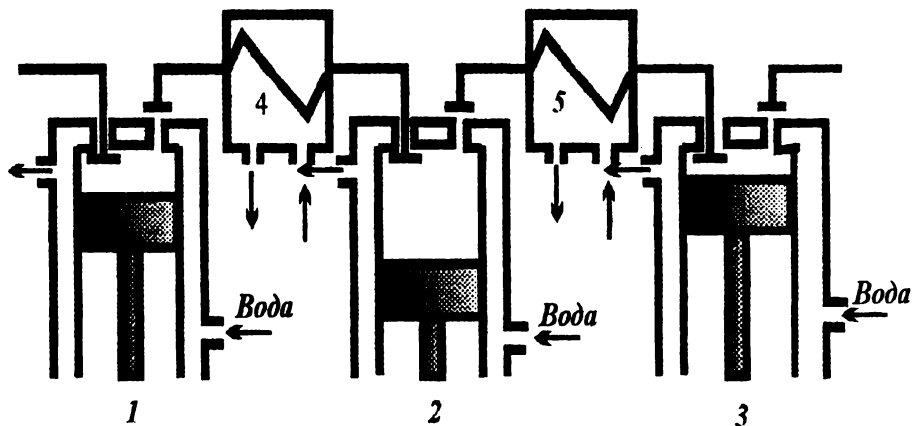


Рис. 2.

Обозначения: 1, 2, 3 – первая, вторая, третья ступени сжатия; 4, 5 – промежуточные охладители. Стрелки на схеме показывают направление движения охлаждающей жидкости.

Диаграммы процесса сжатия в трехступенчатом компрессоре в  $p-v$  и  $T-S$  – диаграммах изображены на рисунке 3.

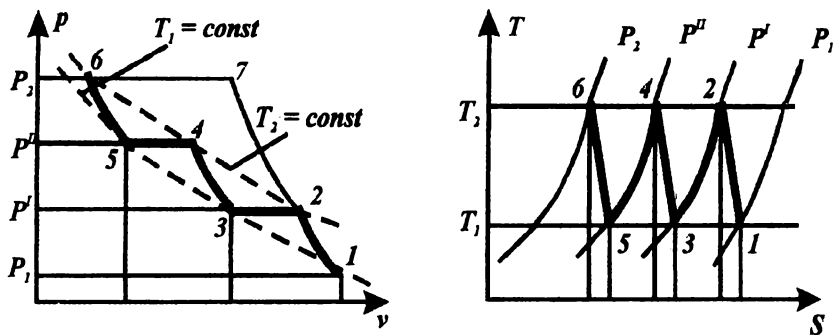


Рис. 3

Обозначения:  $p_1, p', p'', p_2$  – начальное, промежуточные после первой и второй ступени и конечное давления, соответственно,  $T_1, T_2$  – температуры начала и конца сжатия, соответственно, 1-2, 3-4, 5-6, – политропное сжатие в первой, второй, третьей ступенях компрессора, 2-3, 4-5 – изобарное охлаждение газа в промежуточных холодильниках.

Если рабочее тело перед каждой ступенью охлаждается до начальной температуры, то мощность, затрачиваемая в каждой ступени, будет одинакова, т.е.

$$N_I = N_{II} = \dots = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left( \varepsilon_1^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right).$$

Теплота, отводимая при политропном сжатии в каждой ступени, будет одинакова и равна

$$Q_I = Q_{II} = \dots = GC_v \frac{n-k}{n-1} (T_1 - T_2),$$

где  $T_2 = T_1 \varepsilon_1^{\frac{n-1}{n}}$  – температура рабочего тела за каждой ступенью компрессора.

Теплота, отводимая за 1 секунду от рабочего тела в каждом промежуточном охладителе (теплообменнике), может быть вычислена по формуле

$$Q_{охл} = GC_p (T_2 - T_1).$$

**Пример:**

В двухступенчатом компрессоре, производительностью  $V_1 = 100 \text{ м}^3/\text{час}$ , сжимается воздух от  $T_1 = 300 \text{ К}$  и  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  до  $p_2 = 6,4 \text{ МПа}$  по политропе с показателем политропы  $n = 1,2$ .

Определить мощность привода компрессора  $N$  и расход охлаждающей воды  $G_w$ , если вода, проходя через компрессор и промежуточные холодильники, нагревается на  $\Delta t = 13^\circ\text{C}$ .

**Решение:**

Степень повышения давления в каждой ступени будет:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \sqrt[n]{\varepsilon} = \sqrt[n]{\frac{p_2}{p_1}} = \sqrt[3]{\frac{6,4}{0,1}} = 8.$$

Давление газа после первой ступени

$$p' = p_1 \cdot \varepsilon_1 = 0,1 \cdot 8 = 0,8 \text{ МПа}.$$

Мощность, затрачиваемая на сжатие воздуха в 1 ступени компрессора

$$N_1 = \frac{n p_1 V_1}{n-1} \left( \varepsilon_1^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = \frac{1,2 \cdot 10^2 \cdot 100}{(1,2-1) \cdot 3600} \left( 8^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right) = 6,9 \text{ кВт}.$$

Мощность двухступенчатого компрессора.

$$N = 2 N_1 = 13,8 \text{ кВт}.$$

Расход охлаждающей воды через компрессор

$$G_w = \frac{Q}{C_{p_w} \Delta t},$$

где  $Q$  – количество теплоты, которое забирает охлаждающая вода от воздуха, сжимаемого в компрессоре.

$$Q = m Q_1 + (m-1) Q_{\text{охл}}.$$

Для расчета  $Q_1$  и  $Q_{\text{охл}}$  нужно знать массовую производительность компрессора и температуру за каждой ступенью компрессора.

Массовая производительность компрессора:

$$G = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{10^2 \cdot 100}{\frac{8314}{29} \cdot 300} = 0,032 \text{ кг/с}$$

Температура воздуха после каждой ступени сжатия компрессора:

$$T_2 = T_1 \varepsilon_1^{\frac{n-1}{n}} = 300 \cdot 8^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 424 \text{ К}.$$

Количество теплоты, отводимой от каждой ступени компрессора:

$$Q_I = Q_{II} = GC_V \frac{n-k}{n-1} (T_1 - T_2) =$$

$$= 0,032 \frac{20,8}{29} \cdot \frac{1,2 - 1,4}{1,2 - 1} \cdot (300 - 424) = 2,85 \text{ кДж/с.}$$

Теплота, отводимая в промежуточном охладителе:

$$Q_{\text{охл}} = G \cdot C_p (T_2 - T_1) = 0,032 \frac{29,1}{29} (424 - 300) = 3,98 \text{ кДж/с.}$$

Расход охлаждающей воды:

$$G_{\text{в}} = \frac{mQ_I + (m-1)Q_{\text{охл}}}{C_{\text{рв}} \Delta t} = \frac{2 \cdot 2,85 + 3,98}{4,19 \cdot 13} = 9,68 \text{ кг/с,}$$

где  $C_{\text{рв}} = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$  – теплоемкость воды.

### Задача № 3

Цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания имеет следующие характеристики:

$n_1$  – показатель политропы в процессе сжатия рабочего тела, (процесс 1- 2);

$n_2$  – показатель политропы в процессе расширения рабочего тела, (процесс 3- 4);

$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$  – степень сжатия;  $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$  – степень повышения давления;

$\rho = \frac{v_3}{v_2}$  – степень предварительного расширения.

Начальные параметры  $p_1$  и  $t_1$ . Принимая за рабочее тело воздух, требуется:

1. Определить тип цикла ДВС;
2. Определить параметры  $p, v, T$  для основных точек (1, 2, 3, 4) цикла;
3. Найти теплоту  $q$  и работу  $w$  для каждого процесса, из которых состоит цикл;
4. Найти работу цикла  $l_0$ , термический КПД  $\eta_t$  и среднеиндикаторное давление;
5. Изобразить цикл в  $T-S$  – диаграмме;
6. Показать на  $p-v$  и  $T-S$  – диаграммах процессы, в которых осуществляется подвод тепла и в которых тепло отводится.

Теплоемкость рабочего тела, обладающего свойствами воздуха, принять постоянной (приложение, таблица 1).

Исходные данные, необходимые для решения задачи, приведены в таблице 5 по вариантам индивидуальных заданий.