

ИДЗ 3. Расчет термодинамического цикла двухступенчатого поршневого компрессора

Рассчитать параметры термодинамического цикла двухступенчатого поршневого компрессора.

Известными величинами являются следующие (исходные данные см. в конце работы):

1. Сжимаемый газ _____

2. Производительность:

$$V_1 = \text{_____ м}^3/\text{с}$$

3. Начальные параметры газа:

$$p_1 = \text{_____} * 10^6 \text{ Па}$$

$$t_1 = \text{_____} \text{ }^\circ\text{C}$$

4. Давление газа в конце второй ступени:

$$p_4 = \text{_____} * 10^6 \text{ Па.}$$

5. Сжатие происходит по политропе с показателем:

$$n = \text{_____}$$

После сжатия в каждой ступени газ охлаждается до первоначальной температуры t_1 в промежуточном и конечном холодильниках.

Определить:

1) Абсолютное давление, удельный объем и абсолютную температуру во всех характерных точках цикла;

2) Расход охлаждающей воды, проходящей через рубашки цилиндров и через холодильники, если вода при этом нагревается на $\Delta T_B = \text{_____}$ К;

3) Работу, затраченную на привод компрессора;

4) Построить рабочий процесс компрессора в p - v диаграмме.

Решение

1. Найдем промежуточное давление в ступенях компрессора p_2 и p_3 из условия, что отношение конечного давления к начальному давлению (степень повышения давления) Z в обоих цилиндрах одинаковы $Z = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3}$:

$$Z = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3}$$

$$a) p_2 = p_3 = \sqrt{p_4 \cdot p_1}, \text{ Па} \quad (2.1)$$

$$б) Z = \sqrt{\frac{p_4}{p_1}} \quad (2.2)$$

2. Найдем температуру в конце сжатия:

$$T_2 = T_1 \cdot Z^{\frac{n-1}{n}}, \text{ К} \quad (2.3)$$

где T_1 – абсолютная температура газа вначале сжатия, К:

$$T_1 = t_1 + 273, \text{ К} \quad (2.4)$$

3. Определяем объемы газов в характерных точках цикла за 1 сек. (см. рис. 1):

a) $V_1 = \text{_____}$ м³/с (по условию)

$$б) V_2 = \frac{V_1}{Z^n}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.5)$$

$$в) V_3 = \frac{V_1}{Z}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.6)$$

$$e) V_4 = \frac{V_1}{Z^{\frac{n+1}{n}}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.7)$$

$$d) V_5 = \frac{V_1}{Z^2}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.8)$$

где V_1 и V_3 – объемы газа в начале сжатия соответственно в первом и втором цилиндрах;
 V_2 и V_4 – объемы газа в конце сжатия соответственно в первом и втором цилиндрах;
 V_5 – объем газа, выходящего из компрессора

4. Определим массу газа m , проходящего через компрессор за 1 сек. из выражения:

$$p \cdot V = m \cdot R_{\Gamma} \cdot T \quad (2.9)$$

где R_{Γ} – газовая постоянная заданного газа:

$$R_{\Gamma} = \frac{8314}{\mu_{\Gamma}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (2.10)$$

где μ_{Γ} – молекулярная масса заданного газа (см. приложение 1).

Тогда получим:

$$m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_{\Gamma} \cdot T_1}, \text{ кг/с} \quad (2.11)$$

5. Найдем тепло, отводящееся водой от цилиндров и холодильников.

а) Найдем энергию нагрева газов при сжатии в цилиндре, которая отдается воде $Q_{\text{ЦИЛ}}$:

$$Q_{\text{ЦИЛ}} = m \cdot c_{\text{VT}} \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1), \text{ кДж/с} \quad (2.12)$$

где k – коэффициент адиабаты

$$k = \frac{c_{\text{PT}}}{c_{\text{VT}}} > 1 \quad (2.13)$$

где c_{PT} – изобарная массовая теплоемкость заданного газа, кДж/кг·К (см. приложение 2);
 c_{VT} – изохорная массовая теплоемкость заданного газа, кДж/кг·К (см. приложение 2)

б) Найдем энергию газов, отдаваемую воде при охлаждении в холодильнике $Q_{\text{ХОЛ}}$:

$$Q_{\text{ХОЛ}} = m \cdot c_{\text{PT}} \cdot (T_2 - T_1), \text{ кДж/с} \quad (2.14)$$

в) Найдем общее количество тепла, отдаваемое воде во всем процессе, при этом $Q_{\text{ЦИЛ}}$ и $Q_{\text{ХОЛ}}$ подставить со знаком (+):

$$Q_{\text{ОБЩ}} = 2 \cdot (Q_{\text{ЦИЛ}} + Q_{\text{ХОЛ}}), \text{ кДж/с} \quad (2.15)$$

6. Найдем расход воды, необходимой для охлаждения компрессора $m_{\text{В}}$:

$$m_{\text{В}} = \frac{Q_{\text{ОБЩ}}}{c_{\text{В}} \cdot \Delta T_{\text{В}}}, \text{ кг/с} \quad (2.16)$$

где $c_{\text{В}} = 4,2$ кДж/(кг·К) – теплоемкость воды

7. Найти работу, затраченную на сжатие газа в компрессоре.

а) работа в первой ступени:

$$l_1 = \frac{n}{n-1} p_1 \cdot v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \text{ Дж} \quad (2.17)$$

б) работа во второй ступени:

$$l_2 = \frac{n}{n-1} p_3 \cdot v_3 \left[\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \text{ Дж} \quad (2.18)$$

Работа в первой ступени должна равняться работе во второй ступени $l_1 \approx l_2$.

в) общая работа, затраченная на привод компрессора:

$$l_{\text{общ}} = l_1 + l_2, \text{ Дж} \quad (2.18)$$

8. Построить термодинамический цикл компрессора в $p-v$ диаграмме (см. рис. 1б).

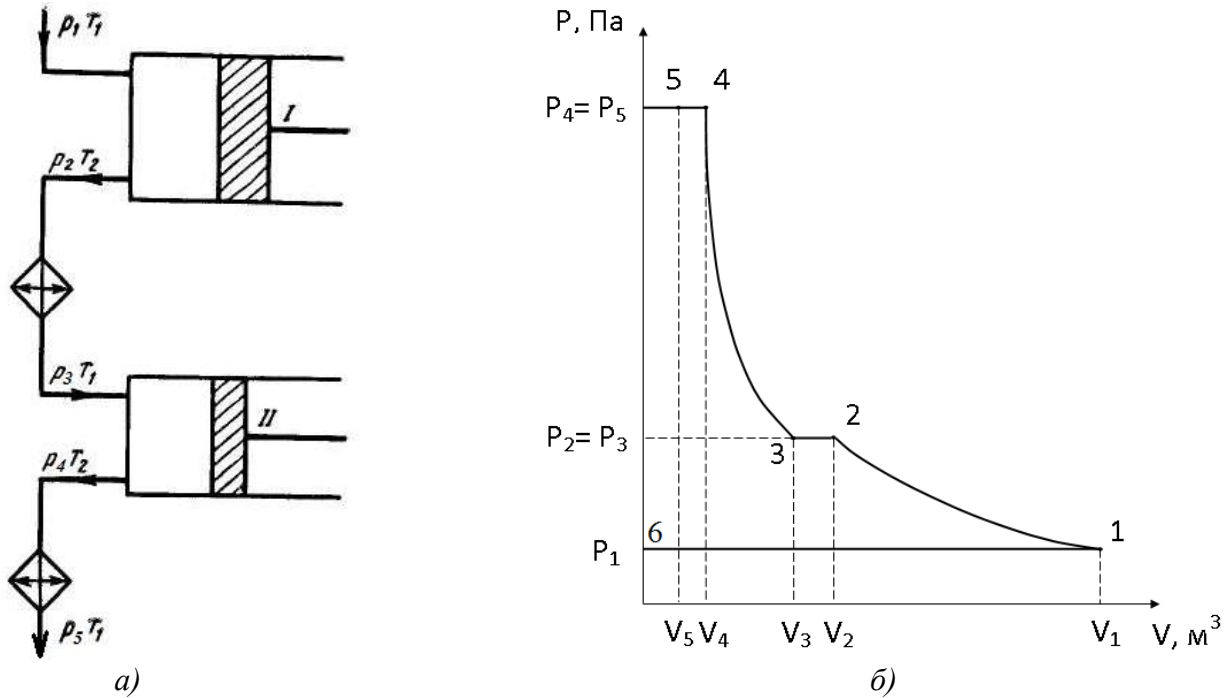


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и диаграмма цикла (б) двухступенчатого поршневого компрессора

Приложение 1

Молекулярные массы, плотности и газовые постоянные важнейших газов при нормальных условиях

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса, μ , кг/кмоль	Плотность ρ , кг/м ³	Газовая постоянная R_g , Дж/(кг·К)
Воздух	-	28,96	1,293	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	296,8
Атмосферный азот ¹	N ₂	28,16	(1,257)	(295,3)
Гелий	He	4,003	0,179	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	4124,0
Оксид углерода	CO	28,01	1,250	296,8
Двуоксид углерода	CO ₂	44,01	1,977	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	290,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	488,3
Водяной пар ²	H ₂ O	18,016	(0,804)	(461)

Массовые изобарные C_{P_i} и массовые изохорные C_{V_i} теплоемкости газов, в зависимости от температуры, $кДж/(кг \cdot K)$ [6]

Температура $t, ^\circ C$	Углекислый газ CO_2		Кислород O_2		Азот N_2	
	$C_{P(CO_2)}$	$C_{V(CO_2)}$	$C_{P(O_2)}$	$C_{V(O_2)}$	$C_{P(N_2)}$	$C_{V(N_2)}$
0	0,8148	0,6259	0,9148	0,6548	1,0392	0,7423
100	0,8658	0,6770	0,9232	0,6632	1,0404	0,7427
200	0,9102	0,7214	0,9353	0,6753	1,0434	0,7465
300	0,9487	0,7599	0,9500	0,6900	1,0488	0,7519
400	0,9826	0,7938	0,9651	0,7051	1,0567	0,7599
500	1,0128	0,8240	0,9793	0,7193	1,0660	0,7691
600	1,0396	0,8508	0,9927	0,7327	1,0760	0,7792
700	1,0639	0,8746	1,0048	0,7448	1,0869	0,7900
800	1,0852	0,8964	1,0157	0,7557	1,0974	0,8005
900	1,1045	0,9157	1,0258	0,7658	1,1078	0,8110
1000	1,1225	0,9332	1,0350	0,7750	1,1179	0,8210
1100	1,1384	0,9496	1,0434	0,7834	1,1271	0,8302
1200	1,1530	0,9638	1,0509	0,7913	1,1359	0,8395

Температура $t, ^\circ C$	Водяной пар H_2O		Метан CH_4		Воздух	
	$C_{P(H_2O)}$	$C_{V(H_2O)}$	$C_{P(CH_4)}$	$C_{V(CH_4)}$	$C_{P(B)}$	$C_{V(B)}$
0	1,8594	1,3980	0,5172	0,3934	1,0036	0,7164
100	1,8728	1,4114	0,5848	0,4610	1,0061	0,7193
200	1,8937	1,4323	0,6704	0,5466	1,0115	0,7243
300	1,9192	1,4574	0,7584	0,6346	1,0191	0,7319
400	1,9477	1,4863	0,8430	0,7192	1,0283	0,7415
500	1,9778	1,5160	0,9210	0,7972	1,0387	0,7519
600	2,0092	1,5474	0,9919	0,8681	1,0496	0,7624
700	2,0419	1,5805	1,0560	0,9322	1,0605	0,7733
800	2,0754	1,6140	1,1129	0,9891	1,0710	0,7842
900	2,1097	1,6483	1,1638	1,0400	1,0815	0,7942
1000	2,1436	1,6823	1,2089	1,0851	1,0907	0,8039
1100	2,1771	1,7158	1,2483	1,1245	1,0999	0,8127
1200	2,2106	1,7488	1,2820	1,1582	1,1082	0,8215

Исходные данные

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сжимаемый газ	CO ₂	CH ₄	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	CH ₄	O ₂	N ₂	Воздух
$V_1, \text{ м}^3/\text{с}$	0,55	0,55	0,5	0,5	0,15	0,15	0,2	0,2	0,25	0,25
$P_1 \cdot 10^6, \text{ Па}$	0,31	0,3	0,28	0,34	0,4	0,35	0,28	0,38	0,31	0,35
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	7	10	15	18	22	25	28	30	20	36
$P_4 \cdot 10^6, \text{ Па}$	3,0	2,6	2,0	3,2	3,6	3,2	2,6	1,5	3,0	3,3
n	1,08	1,09	1,1	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18
$\Delta T_B, \text{ К}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Сжимаемый газ	CO ₂	CH ₄	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	CH ₄	O ₂	N ₂	Воздух
$V_1, \text{ м}^3/\text{с}$	0,3	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4	0,45	0,45	0,1	0,1
$P_1 \cdot 10^6, \text{ Па}$	0,4	0,32	0,31	0,24	0,3	0,28	0,35	0,4	0,4	0,31
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	7	10	15	18	22	25	28	30	20	36
$P_4 \cdot 10^6, \text{ Па}$	3,6	2,5	2,8	1,1	2,2	2,4	2,8	1,8	3,1	2,4
n	1,19	1,2	1,21	1,22	1,1	1,15	1,18	1,14	1,19	1,16
$\Delta T_B, \text{ К}$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30