

Расчет термодинамического цикла

Условие задания

По заданным исходным параметрам рабочего тела в схеме цикла в P-v координатах требуется:

1. Определить параметры состояния (P; v; T; U; i; S) в крайних точках цикла. Энтальпию и внутреннюю энергию определить относительно состояния при $t = 0^\circ\text{C}$; энтропию определить относительно состояния при нормальных условиях $T = 273\text{ K}$, $P = 760\text{ мм рт. ст.}$
2. Построить цикл в P-v и T-S координатах.
3. Для каждого процесса определить работу, количество подведенной или отведенной теплоты, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии.
4. Определить работу цикла, количество подведенного и отведенного тепла, термический КПД цикла, сравнив последний с КПД цикла Карно, имеющего одинаковые с последним циклом максимальную и минимальную температуры. Рабочее тело - 1 кг воздуха

$$\left(R = 0,287 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; C_p = 1,006 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; C_v = 0,719 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right)$$

Для воздуха применимо уравнение состояния идеального газа. Исходные данные выбрать по номеру задания из таблицы.

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
01	$P_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,09 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,14 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
02	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,8 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
03	$P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,15 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,3 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
04	$t_1 = 200^\circ \text{ C}; P_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^\circ \text{ C}$ $v_3 = 0,5 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_5 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
05	$t_1 = 250^\circ \text{ C}; P_1 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 400^\circ \text{ C}$ $v_3 = 0,7 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_5 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
06	$t_1 = 300^\circ \text{ C}; P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 400^\circ \text{ C};$ $v_3 = 0,35 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_5 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па};$	

07	$t_1 = 25^{\circ}C; P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_3 = 550^{\circ}C;$	
08	$t_1 = 25^{\circ}C; P_1 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_3 = 500^{\circ}C;$	
09	$t_1 = 30^{\circ}C; P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_3 = 600^{\circ}C;$	
10	$P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,3 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 200^{\circ}C;$	
11	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,5 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 400^{\circ}C;$	
12	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,9 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 1200^{\circ}C;$	
13	$P_1 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,08 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 14 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 160^{\circ}C;$	
14	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,6 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 1000^{\circ}C;$	
15	$P_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,15 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 9 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 350^{\circ}C;$	
16	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 90^{\circ}C;$ $P_2 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 300^{\circ}C;$	
17	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 100^{\circ}C;$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 850^{\circ}C;$	
18	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 150^{\circ}C;$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 850^{\circ}C;$	
19	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_2 = 300^{\circ}C; q_1 = 1050 \text{ кДж} / \text{кг};$	
20	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_2 = 400^{\circ}C; q_1 = 500 \text{ кДж} / \text{кг};$	
21	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_2 = 300^{\circ}C; q_1 = 800 \text{ кДж} / \text{кг};$	

22	$P_1 = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 10^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 227^0 \text{ C};$	
23	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 100^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 400^0 \text{ C};$	
24	$P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 10^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 250^0 \text{ C};$	
25	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 85^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 15; q_1 = 920 \text{ кДж} / \text{кг};$	
26	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 20^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 12; q_1 = 500 \text{ кДж} / \text{кг};$	
27	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 40^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 8; q_1 = 300 \text{ кДж} / \text{кг};$	
28	$v_1 = 1,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 80^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 14; q_{2-3} = 840 \text{ кДж} / \text{кг};$	
29	$v_1 = 1,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 50^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 16; q_{2-3} = 900 \text{ кДж} / \text{кг};$	
30	$v_1 = 1,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 30^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 12; q_{2-3} = 700 \text{ кДж} / \text{кг};$	
31	$P_1 = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 10^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 225^0 \text{ C};$	
32	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 30^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,3 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 250^0 \text{ C};$	
33	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 250^0 \text{ C};$	
34	$v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 80^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 5; q_{2-3} = 840 \text{ кДж} / \text{кг};$	
35	$v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 120^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 6; q_{2-3} = 750 \text{ кДж} / \text{кг};$	
36	$v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 30^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 9; q_{2-3} = 650 \text{ кДж} / \text{кг};$	
37	$P_1 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 400^0 \text{ C};$ $P_2 = 14 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
38	$P_1 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 450^0 \text{ C};$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
39	$P_1 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 550^0 \text{ C};$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$	

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
40	$P_1 = 50 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_4 = -35^0 \text{ C};$	
41	$P_1 = 60 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,14 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_4 = 20^0 \text{ C};$	
42	$P_1 = 40 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_4 = 10^0 \text{ C};$	
43	$P_1 = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,25 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 300^0 \text{ C};$	
44	$P_1 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 270^0 \text{ C};$	
45	$P_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,3 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 450^0 \text{ C};$	
46	$P_1 = 13 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^0 \text{ C};$ $t_3 = 17^0 \text{ C}; P_3 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
47	$P_1 = 17 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 350^0 \text{ C};$ $t_3 = 30^0 \text{ C}; P_3 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
48	$P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^0 \text{ C};$ $t_3 = 20^0 \text{ C}; P_3 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
49	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,45 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,14 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
50	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,45 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,14 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
51	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,6 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,15 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
52	$P_1 = 35 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 210^0 \text{ C};$ $t_2 = 250^0 \text{ C}; P_3 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
53	$P_1 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 210^0 \text{ C};$ $t_2 = 250^0 \text{ C}; P_3 = 13 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
54	$P_1 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 250^0 \text{ C};$ $t_2 = 350^0 \text{ C}; P_3 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$	

55	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = -50^\circ \text{ C}; P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $n = 1, 2; \rho = (v_3 / v_2) = 2;$	
56	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 10^\circ \text{ C}; P_2 = 7 \cdot 10^5 \text{ Па}$ $n = 1, 2; \rho = (v_3 / v_2) = 2;$	
57	$P_1 = 1, 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 30^\circ \text{ C}; P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $n = 1, 2, 5; \rho = (v_3 / v_2) = 1, 8;$	
58	$P_1 = 1, 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0, 5 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $t_2 = 130^\circ \text{ C}; P_3 = 40 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
59	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0, 7 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $t_2 = 150^\circ \text{ C}; P_3 = 40 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
60	$P_1 = 0, 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0, 75 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $t_2 = 150^\circ \text{ C}; P_3 = 45 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
61	$P_1 = 1, 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^\circ \text{ C};$ $v_2 = 0, 5 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_3 = 2, 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
62	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 350^\circ \text{ C};$ $v_2 = 0, 2 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_3 = 7 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
63	$P_1 = 1, 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^\circ \text{ C};$ $v_2 = 0, 6 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_3 = 2, 3 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
64	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^\circ \text{ C};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 200^\circ \text{ C};$	
65	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 20^\circ \text{ C};$ $P_2 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 250^\circ \text{ C};$	
66	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^\circ \text{ C};$ $P_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 300^\circ \text{ C};$	
67	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_1 = 300^\circ \text{ K};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 16; \rho = (v_3 / v_2) = 4;$	
68	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_1 = 320^\circ \text{ K};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 14; \rho = (v_3 / v_2) = 3;$	
69	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_1 = 300^\circ \text{ K};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 15; \rho = (v_3 / v_2) = 2;$	
70	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 27^\circ \text{ C};$ $P_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; q_{2-3} = 620 \text{ кДж} / \text{кг};$	
71	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^\circ \text{ C};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; q_{2-3} = 600 \text{ кДж} / \text{кг};$	
72	$P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 20^\circ \text{ C};$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; q_{2-3} = 700 \text{ кДж} / \text{кг};$	

73	$P_1 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 100^0 \text{ C};$ $P_2 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 200^0 \text{ C};$	
74	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 100^0 \text{ C};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 200^0 \text{ C};$	
75	$P_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 150^0 \text{ C};$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 250^0 \text{ C};$	
76	$P_1 = 50 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^0 \text{ C};$ $P_2 = 18 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,1 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
77	$P_1 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^0 \text{ C};$ $P_2 = 12,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
78	$P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^0 \text{ C};$ $P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг};$	

Примечание. Построение цикла в P-v и T-S координатах выполнить в масштабе на миллиметровой бумаге формата 203x288 мм. Кривые строить по промежуточным точкам. Расчет промежуточных точек привести в пояснительной записке.

Результаты расчета свести в таблицу вида:

а) параметры в точках:

Точки	Параметры						
	P, 10^5 Па	v, $\text{м}^3/\text{кг}$	T, $^0\text{К}$	t, ^0C	u, кДж/кг	l, кДж/кг	S, $\text{кДж/кг}\cdot\text{град}$
1							
2							
3							
4							

б) изменение параметров в процессах

Процессы	Параметры				
	λ кДж/кг	Δu кДж/кг	Δi кДж/кг	q кДж/кг	ΔS $\text{кДж/кг}\cdot\text{град}$
1-2					
2-3					
3-4					
4-1					
Сумма					

Пример расчета

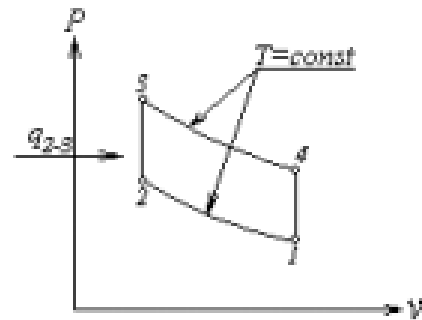
Дано:

$$v = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$t_1 = 80^\circ \text{C};$$

$$\varepsilon = \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = 5;$$

$$q_{2-3} = 838 \text{ кДж} / \text{кг}.$$



Решение:

1. Определение параметров состояния в крайних точках цикла.

Точка 1.

$$v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; \quad t = 80^\circ \text{C} = 353 \text{ K}; \quad p = \frac{R \cdot T_1}{v_1} = \frac{287 \cdot 353}{1,2} = 8,45 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$i_1 = C_p \cdot T_1 = 1,006 \cdot 353 = 354,7 \text{ кДж} / \text{кг}; \quad u_1 = C_v \cdot T_1 = 0,719 \cdot 353 = 251 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$S_1 = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_1}{P_0} = 1,006 \cdot 2,3 \lg \frac{353}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{0,845}{1,01} = 0,81 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Точка 2.

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{v_1}{5} = \frac{1,2}{5} = 0,24 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad P_2 = \frac{v_1}{v_2} \cdot P_1 = \frac{1,2}{0,24} \cdot 8,45 \cdot 10^4 = 4,22 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_2 = T_1 = 353 \text{ K}; \quad i_2 = C_p \cdot T_2 = 1,006 \cdot 353 = 354,7 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$u_2 = C_v \cdot T_2 = 0,719 \cdot 353 = 251 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$S_2 = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_2}{P_0} = 1,006 \cdot 2,3 \lg \frac{353}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{422}{1,01} = -0,151 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Точка 3.

$$v_3 = v_2 = 0,24 \text{ м}^3 / \text{кг}; \quad q_{2-3} = C_v \cdot (T_3 - T_2); \quad T_3 = T_2 + \frac{q_{2-3}}{C_v} = \frac{838}{0,719} + 353 = 1528 \text{ K};$$

$$P_3 = \frac{R \cdot T_3}{v_3} = \frac{287 \cdot 1528}{0,24} = 18 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad i_3 = C_p \cdot T_3 = 1,006 \cdot 1528 = 1535 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$S_3 = C_p \cdot \ln \frac{T_3}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_3}{P_0} = 1,006 \cdot 2,3 \lg \frac{1528}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{18}{1,01} = 0,904 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Точка 4.

$$T_4 = T_3 = 1528 \text{ K}; v_4 = v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_4 = \frac{R \cdot T_4}{v_4} = \frac{287 \cdot 1528}{1,2} = 36,5 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$i_4 = C_p \cdot T_4 = 1,006 \cdot 1528 = 1535 \text{ кДж / кг}; u_4 = C_v \cdot T_4 = 0,719 \cdot 1528 = 1088 \text{ кДж / кг};$$

$$S_4 = C_p \cdot \ln \frac{T_4}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_4}{P_0} = 1,005 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1528}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{3,65}{1,01} = 1,361 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

2. Построение цикла в p - v - и T - s -координатах.

Процессы, изображаемые в p - v - и T - s -координатах кривыми линиями, необходимо проводить как минимум по трем точкам.

Для нахождения параметров промежуточных точек в начале произвольно задаются одним параметром, но так, чтобы значение этого параметра находилось между его значениями в крайних точках процесса. Второй параметр определяется из уравнения, характеризующего данный процесс, составленного для одной из крайних точек процесса и для промежуточной точки.

Процесс 1-2: точка "а". Принимаем $P_2 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

По уравнениям изотермы для точек "а" и 1:

$$P_2 \cdot v_2 = P_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1;$$

$$v_2 = \frac{R \cdot T_1}{P_2} = \frac{287 \cdot 353}{25 \cdot 10^4} = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Процесс 3-4: точка "б". Принимаем $P_6 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}$:

$$v_6 = \frac{R \cdot T_3}{P_6} = \frac{287 \cdot 1528}{10 \cdot 10^5} = 0,438 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Процесс 2-3: точка "в". Принимаем $T_3 = 1000^0 \text{ К}$:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2}; P_3 = \frac{P_2 \cdot T_3}{T_2} = \frac{4,22 \cdot 1000}{358} \cdot 10^5 = 11,95 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$S_3 = C_p \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{T_3}{T_2} - R \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{P_3}{P_2} =$$

$$= 1,005 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1000}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{11,95}{1,01} = 0,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Процесс 4-1: точка "r". Принимаем $T_1 = 1000^{\circ} K$:

$$P_1 = \frac{P_1 \cdot T_1}{T_1} = \frac{0,845 \cdot 1000}{353} \cdot 10^5 = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$S_1 = C_p \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{T_1}{T_0} = R \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{P_1}{P_0} =$$

$$= 1,005 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1000}{273} = 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2,4}{1,01} = 1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Графики цикла представлены на рис. 1 и 2.

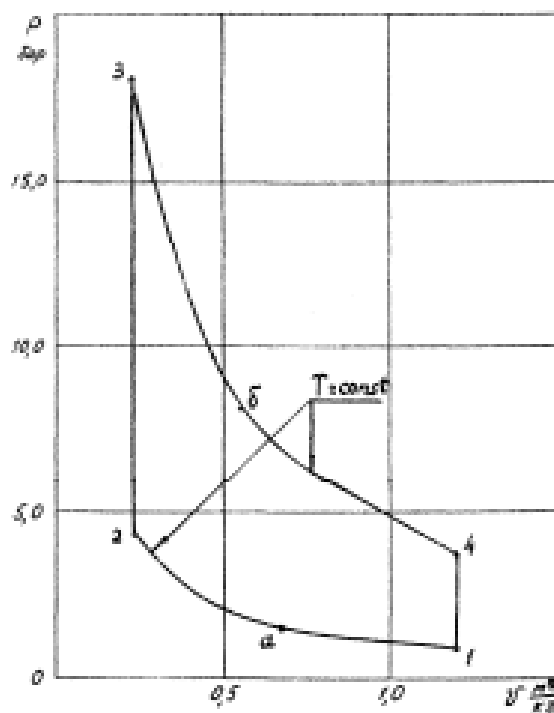


Рис. 1. Цикл в $p - v$ координатах.

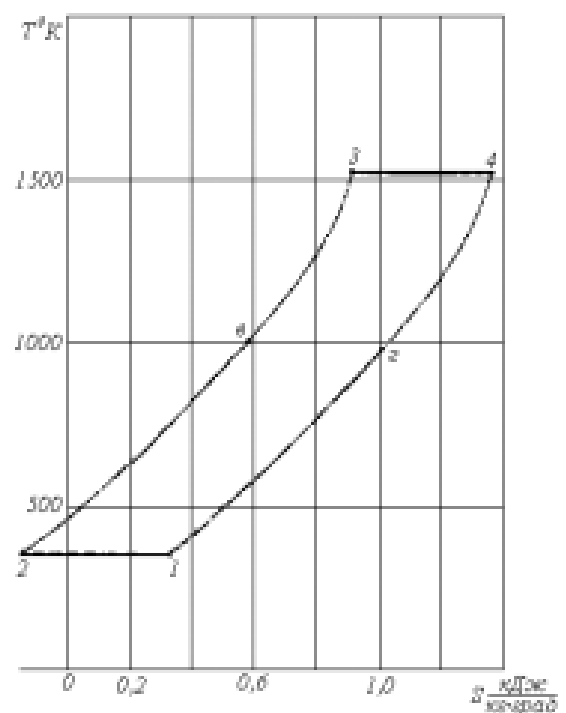


Рис. 2. Цикл в $T - S$ координатах.

3. Определение работы, количества подведенной или отведенной теплоты, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии для каждого процесса цикла.

Процесс 1-2 (изотермический).

$$q_{1-2} = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} = 0,287 \cdot 353 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{0,845}{4,22} = -163 \text{ кДж/кг (теплота отводится);}$$

$$\ell_{1-2} = q_{1-2} = -163 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i_{1-2} = C_p \cdot (T_2 - T_1) = 0;$$

$$\Delta u_{1-2} = C_v \cdot (T_2 - T_1) = 0;$$

$$\Delta S_{1-2} = R \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} = 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{0,845}{4,22} = -0,461 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Процесс 2-3 (изохорический).

$$\lambda_{2-3} = 0; \quad q_{2-3} = C_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,712 \cdot (1528 - 353) = 836 \text{ кДж/кг} \text{ (тепло подводится);}$$

$$\Delta u_{2-3} = q_{2-3} = 836 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i_{2-3} = C_p \cdot (T_3 - T_2) = 1,005 \cdot (1528 - 353) = 1181 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta S_{2-3} = C_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,712 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1528}{353} = 1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Процесс 3-4 (изотермический).

$$q_{3-4} = R \cdot T_3 \cdot \ln \frac{P_3}{P_4} = 0,287 \cdot 1528 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{18,0}{3,65} = 696 \text{ кДж/кг} \text{ (тепло подводится);}$$

$$\lambda_{3-4} = q_{3-4} = 696 \text{ кДж/кг}; \quad \Delta i_{3-4} = C_p \cdot (T_4 - T_3) = 0; \quad \Delta u_{3-4} = C_v \cdot (T_4 - T_3) = 0;$$

$$\Delta S_{3-4} = R \cdot \ln \frac{P_3}{P_4} = 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{18,0}{3,65} = 0,456 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Процесс 4-1 (изохорический).

$$\lambda_{4-1} = 0; \quad q_{4-1} = C_v \cdot (T_1 - T_4) = 0,712 \cdot (353 - 1528) = -836 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u_{4-1} = q_{4-1} = -836 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i_{4-1} = C_p \cdot (T_1 - T_4) = 1,005 \cdot (353 - 1528) = -1181 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta S_{4-1} = C_v \cdot \ln \frac{T_1}{T_4} = 0,712 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{353}{1528} = -1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Данные вычислений сводятся в таблицы.

Точ- ки	Параметры						
	P	v	T	t	u	i	S
	10^5 Па	$\text{м}^3/\text{кг}$	K	$^{\circ}\text{C}$	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг·град
1	0,845	1,2	353	80	251	354,7	0,31
2	4,22	0,24	353	80	354,7	354,7	-0,151
3	18,0	0,24	1528	1255	1088	1535	0,904
4	3,65	1,2	1528	1255	1088	1535	1,361

Процессы	Параметры				
	λ	Δu	Δi	q	ΔS
	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг·град
1-2	-163,0	0	0	-163,0	-0,461
2-3	0	836,0	1181,0	836,0	1,05
3-4	696,0	0	0	696,0	0,456
4-1	0	-836,0	-1181,0	-836,0	-1,05
Сумма	533,0	0	0	533,0	-0,005

4. Работа цикла.

$$\lambda_v = \lambda_{1-2} + \lambda_{2-3} + \lambda_{3-4} + \lambda_{4-1} = -163 + 0 + 696 + 0 = 533 \text{ кДж/кг.}$$

5. Количество подведенной теплоты в цикле:

$$q_1 = q_{2-3} + q_{3-4} = 836 + 696 = 1532 \text{ кДж/кг.}$$

Количество отведенной теплоты в цикле:

$$q_2 = q_{1-2} + q_{4-1} = 163 + 836 = 999 \text{ кДж/кг.}$$

Количество полезно использованной теплоты:

$$q_{\text{полн}} = q_1 - q_2 = 1532 - 999 = 533 \text{ кДж/кг.}$$

6. Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{q_{\text{полн.}}}{q_{\text{подв.}}} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{1532 - 999}{1532} = 0,347.$$

КПД цикла Карно, имеющего одинаковые с расчетным циклом максимальную и минимальную температуры:

$$\eta_t^K = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{353}{1528} = 0,769; \quad \eta_t^K > \eta_t.$$