

Определить показатель политропы, конечные параметры газа, работу сжатия и количество отведенной наружу теплоты.

89. Смесь коксового газа с воздухом сжимается по политропе с показателем $n=1,38$; начальное давление $p_1=0,1$ МПа, начальная температура $t_1=50^\circ\text{C}$. Определить конечную температуру и давление, если степень сжатия $\varepsilon =4$.

90. Углекислый газ с начальной температурой 70°C и абсолютным давлением $p_1 = 0,1$ МПа необходимо довести до абсолютного давления $p_2 = 0,14$ МПа так, чтобы отношение подведенной к газу теплоты к совершенной газом работе составляло 10. Считая процесс политропным, определить теплоемкость указанного процесса и конечную температуру газа.

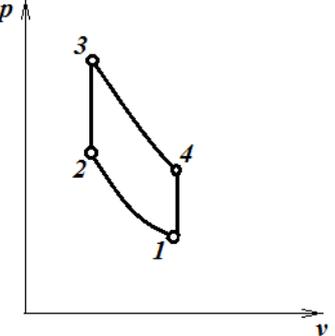
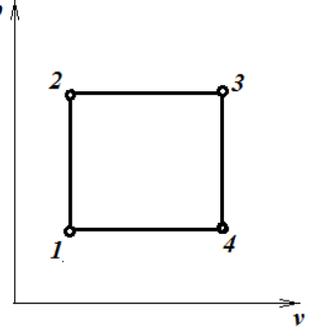
3. ИДЕАЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

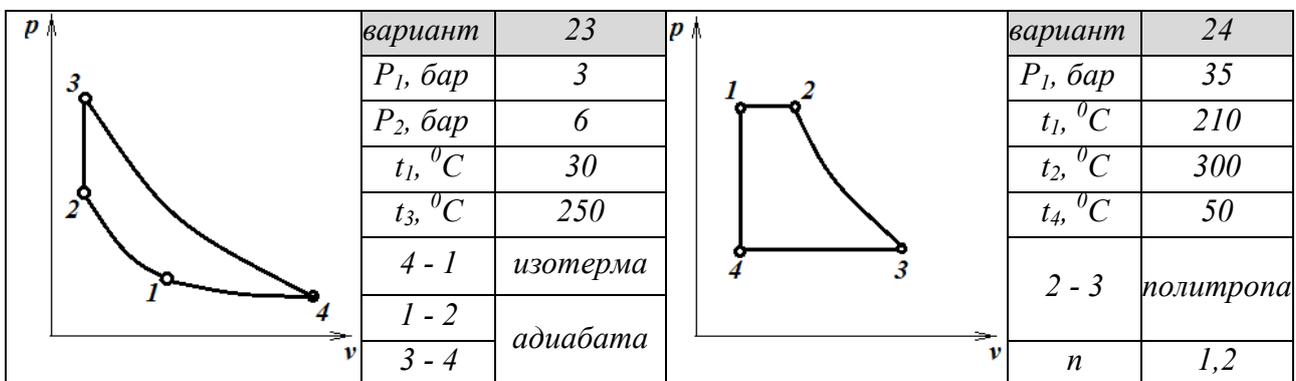
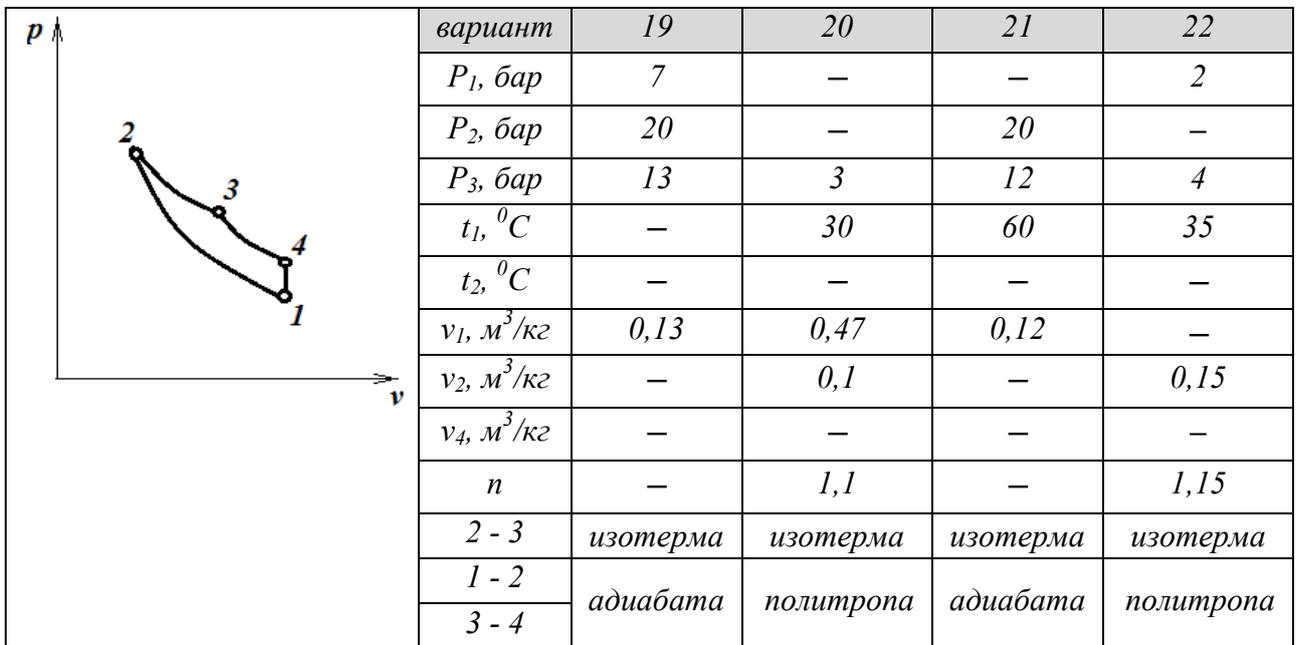
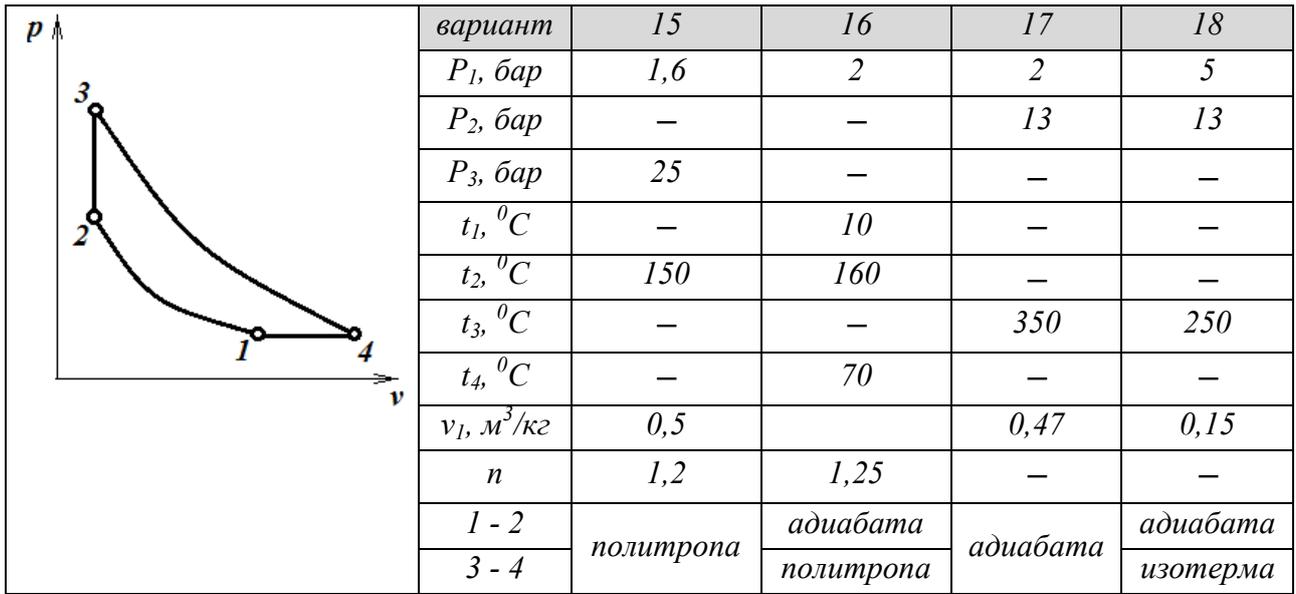
3.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

ИДЕАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Задание

- определить основные параметры состояния p, v, T в характерных точках цикла;
- определить для каждого процесса, входящего в цикл, $\Delta u, \Delta s, q, l$;
- определить термический КПД цикла;
- графическое изображение цикла в p, v - и T, s -координатах.

	вариант	1		вариант	2
	P_1 , бар	3		P_1 , бар	12
	P_2 , бар	8		P_2 , бар	14
	t_1 , $^\circ\text{C}$	27		t_3 , $^\circ\text{C}$	150
	t_3 , $^\circ\text{C}$	200		v_1 , $\text{м}^3/\text{кг}$	0,08
	1 – 2	изо-			
3 – 4	терма				



3.2. ПРИМЕР ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Исходные данные

Идеальный цикл изображен на рисунке 3.1.

$p_1=1$ атм, $p_2=5$ атм, $t_1=0$ °С, $t_3=200$ °С,
 $n = 1,3$. Процессы 1–2 и 3–4 – политропные. Рабочее тело – воздух.

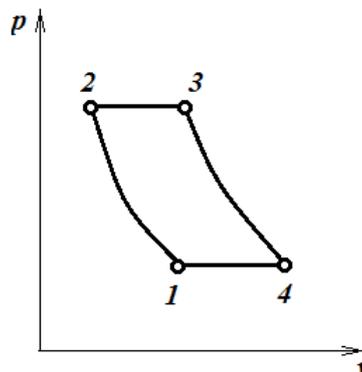


Рис. 3.1. Идеальный цикл

Определяем газовую постоянную для воздуха:

$$R = \frac{R_y}{\mu_B} = \frac{8314}{28,96} = 287,08 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Рассчитываем массовую теплоемкость в изохорном процессе:

$$c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287,08}{1,41-1} = 700,21 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

В цикл входят изобарные (рис 3.1) и политропные процессы. Определяем массовые теплоемкости для этих процессов:

$$c_p = kc_v = 1,41 \cdot 700,21 = 987,29 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1} = 700,21 \frac{1,3-1,41}{1,3-1} = -256,74 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Для удобства определения основных параметров состояния используют таблицу 3.1. Записываем в таблицу исходные данные в системе СИ. Учитываем два изобарных процесса, т.е. $p_2 = p_3$ и $p_1 = p_4$ (рис 3.1).

Для точек 1 и 3, где известны два параметра состояния (таблица 3.1) находим третий по уравнению состояния $pv = RT$:

$$\psi = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287,08 \cdot 273}{101325} = 0,77 \text{ м}^3/\text{кг};$$

Таблица 3.1

Основные параметры состояния в характерных точках цикла

параметр / точка	1	2	3	4
$v, \text{м}^3/\text{кг}$				
$T, \text{К}$	273		473	
$p, \text{Па}$	101325	506625	506625	101325

$$\vartheta = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{287,08 \cdot 473}{506625} = 0,27 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для точки 2 известна только величина давления p . Для определения остальных параметров в точке 2 смотрим соседние точки, в которых известны все основные параметры состояния. В точке 3 (таблица 3.2) давление $p_3 = p_2$, смотрим точку 1.

Таблица 3.2

Основные параметры состояния в характерных точках цикла

параметр / точка	1	2	3	4
$v, \text{м}^3/\text{кг}$	0,77		0,27	
$T, \text{К}$	273		473	
$p, \text{Па}$	101325	506625	506625	101325

В точке 1 давление $p_1 \neq p_2$, поэтому для дальнейшего расчета можно воспользоваться зависимостями для процесса 1–2, т.е. для политропного процесса (приложение 1).

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right)^n$$

Находим удельный объем в точке 2:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,77 \left(\frac{101325}{506625} \right)^{\frac{1}{1,3}} = 0,22 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Третий параметр в точке 2 находим по уравнению состояния:

$$T_2 = \frac{v_2 p_2}{R} = \frac{0,22 \cdot 506625}{287,08} = 388,24 \text{ К}.$$

Параметры в точке 4 рассчитываем аналогично точке 2. Для определения параметров в точке 4 смотрим соседние точки 3 и 1, в которых известны все основные параметры состояния. В точке 1 (таблица 3.2) давление $p_1 = p_4$, смотрим точку 3. В точке 3 давление $p_3 \neq p_4$, поэтому для дальнейшего расчета можно воспользоваться зависимостями для процесса 3–4, т.е. для политропного процесса (приложение 1).

$$\frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^n$$

Находим удельный объем в точке 4:

$$v_4 = v_3 \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,27 \left(\frac{506625}{101325} \right)^{\frac{1}{1,3}} = 0,93 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Третий параметр в точке 4 находим по уравнению состояния:

$$T_4 = \frac{v_4 p_4}{R} = \frac{0,93 \cdot 101325}{287,08} = 328,66 \text{ К}.$$

Таблица 3.3

Основные параметры состояния в характерных точках цикла

параметр / точка	1	2	3	4
$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	0,77	0,22	0,27	0,93
$T, \text{ К}$	273	388,24	473	328,66
$p, \text{ Па}$	101325	506625	506625	101325

Определяем для каждого процесса, входящего в цикл, Δu , Δs , q , l по формулам, приведенным в приложении 1.

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) = 700,21(388,24 - 273) = 80692,2 \text{ Дж/кг};$$

$$\Delta u_{2-3} = c_v(T_3 - T_2) = 700,21(473 - 388,24) = 59349,8 \text{ Дж/кг};$$

$$\Delta u_{3-4} = c_v(T_4 - T_3) = 700,21(328,66 - 473) = -101068,31 \text{ Дж/кг};$$

$$\Delta u_{4-1} = c_v(T_1 - T_4) = 700,21(273 - 328,66) = -38973,69 \text{ Дж/кг}.$$

Теплота:

$$q_{1-2} = c_n(T_2 - T_1) = -256,74(388,24 - 273) = -29586,72 \text{ Дж/кг};$$

$$q_{2-3} = c_p(T_3 - T_2) = 987,29(473 - 388,24) = 83682,7 \text{ Дж/кг};$$

$$q_{3-4} = c_n(T_4 - T_3) = -256,74(328,66 - 473) = 37057,85 \text{ Дж/кг};$$

$$q_{4-1} = c_p(T_1 - T_4) = 987,29(273 - 328,66) = -54952,56 \text{ Дж/кг}.$$

Работа:

$$l = q - \Delta u$$

$$l_{1-2} = -29586,72 - 80692,2 = -110278,92 \text{ Дж/кг};$$

$$l_{2-3} = 83682,7 - 59349,8 = 24332,9 \text{ Дж/кг};$$

$$l_{3-4} = 37057,85 - (-101068,31) = 138126,16 \text{ Дж/кг};$$

$$l_{4-1} = -54952,56 - (-38973,69) = -15978,87 \text{ Дж/кг}.$$

Таблица 3.4

Характеристики процессов цикла

параметр процесс	1-2	2-3	3-4	4-1
q , Дж/кг	-29586,72	83682,7	37057,85	-54952,56
l , Дж/кг	-110278,92	24332,9	138126,16	-15978,87
Δu , Дж/кг	80692,2	59349,8	-101068,31	-38973,69
Δs , Дж/(кг·К)	-94,41	194,96	93,47	-193,19

Изменение энтропии:

$$\Delta s_{1-2} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = -256,74 \ln \frac{388,24}{273} = -94,41 \text{ Дж/(кг·К)};$$

$$\Delta s_{2-3} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2} = 987,29 \ln \frac{473}{388,24} = 194,96 \text{ Дж/(кг·К)};$$

$$\Delta s_{3-4} = c_v \ln \frac{T_4}{T_3} = -256,74 \ln \frac{328,66}{473} = 93,47 \text{ Дж/(кг·К)};$$

$$\Delta s_{4-1} = c_p \ln \frac{T_1}{T_4} = 987,29 \ln \frac{273}{328,66} = -193,19 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Результаты расчета заносим в таблицу 3.4.

Выполняем проверку:

$$\Sigma l_i = -110278,92 + 24332,9 + 138126,16 + (-15978,87) = 36201,27 \text{ Дж/кг};$$

$$\Sigma q_i = -29586,72 + 83682,7 + 37057,85 + (-54952,56) = 36201,27 \text{ Дж/кг};$$

$$\Sigma \Delta u_i = 80692,2 + 59349,8 + (-101068,31) + (-38973,69) = 0 \text{ Дж/кг};$$

$$\Sigma \Delta s_i = -94,41 + 194,96 + 93,47 + (-193,19) = 0,83 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Определяем количество подведенной и отведенной теплоты.

Подведенная теплота:

$$q_1 = q_{2-3} + q_{3-4} = 83682,7 + 37057,85 = 120740,55 \text{ Дж/кг}.$$

Отведенная теплота:

$$q_2 = q_{1-2} + q_{4-1} = -29586,72 + (-54952,56) = -84539,28 \text{ Дж/кг}.$$

Определяем термический КПД цикла:

$$\eta = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{84539,28}{120740,55} = 0,3$$

3.3. ПРИМЕР ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА СО СМЕШАНЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Исходные данные

Цикл изображен на рисунке 3.2.

$$p_1 = 1 \text{ бар}, \quad t_1 = 33 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \varepsilon = 15, \quad q_1' = 100 \text{ ккал/кг} = 418700 \text{ Дж/кг},$$

$$q_1'' = 120 \text{ ккал/кг} = 502440 \text{ Дж/кг}, \text{ Рабочее тело – воздух.}$$

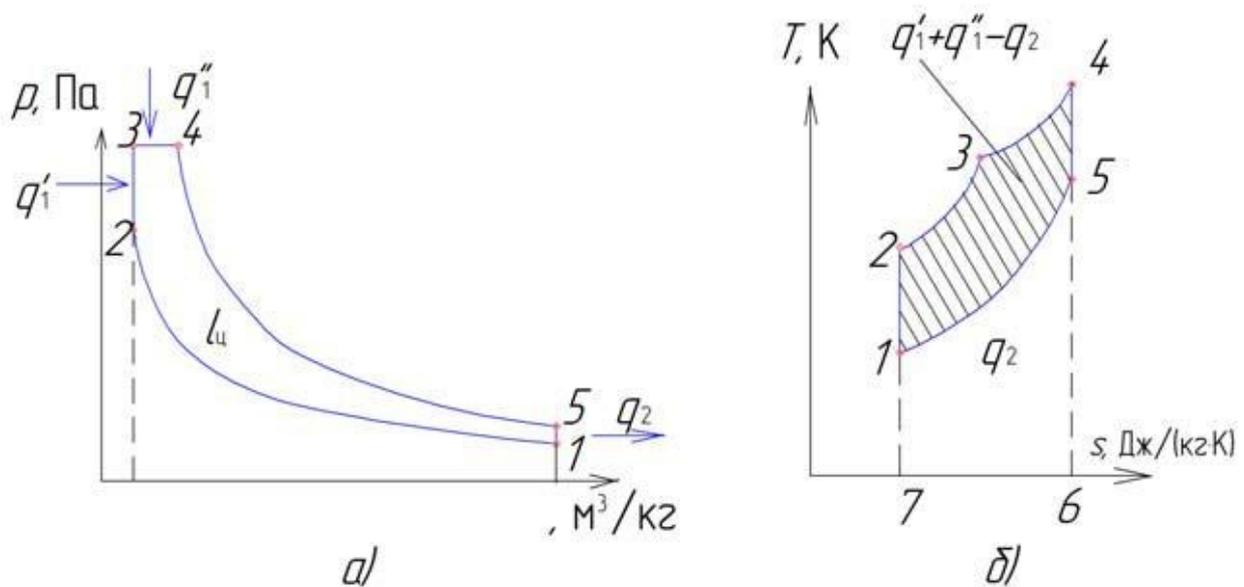


Рис. 3.2. Идеальный цикл двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты в $p-v$ (а) и $T-s$ (б) координатах

Определяем газовую постоянную для воздуха:

$$R = \frac{R_y}{\mu_b} = \frac{8314}{28,96} = 287,08 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Рассчитываем массовую теплоемкость в изохорном процессе:

$$c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287,08}{1,41-1} = 700,21 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

В цикл входит изобарный (рис 3.2) процесс. Определяем массовую теплоемкость для этого процесса:

$$c_p = kc_v = 1,41 \cdot 700,21 = 987,29 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

Для удобства определения основных параметров состояния используют таблицу 3.5. Записываем в таблицу исходные данные в системе СИ.. Учитываем два изохорных процесса ($v_2 = v_3$ и $v_1 = v_5$), изобарный процесс, т.е. $p_4 = p_3$ (рис 3.2).

Для точки 1 известны два параметра состояния (таблица 3.5), находим третий по уравнению состояния $pv = RT$:

$$\psi = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287,08 \cdot 306}{100000} = 0,88 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Основные параметры состояния в характерных точках цикла

параметр / точка	1	2	3	4	5
$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$v_1 = v_5$	$v_2 = v_3$	$v_2 = v_3$		$v_1 = v_5$
$T, \text{К}$	306				
$p, \text{Па}$	100000		$p_4 = p_3$	$p_4 = p_3$	

Кроме параметров состояния в 1 точке известны еще три величины:

$$q_1' = c_v(T_3 - T_2);$$

$$q_1'' = c_p(T_4 - T_3);$$

$$\varepsilon = v_1/v_2.$$

Зная степень сжатия находим удельный объем в точке 2:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,88}{15} = 0,059 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для определения остальных параметров в точке 2 смотрим соседнюю точку 1, в которой известны все основные параметры состояния. В точке 1 объем $v_1 \neq v_2$, поэтому для дальнейшего расчета можно воспользоваться зависимостями для процесса 1–2, т.е. для адиабатного процесса (приложение 1).

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

Находим давление в точке 2:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = 100000 \left(\frac{0,88}{0,059} \right)^{1,41} = 4552905,91 \text{ Па}.$$

Третий параметр в точке 2 находим по уравнению состояния:

$$T_2 = \frac{v_2 p_2}{R} = \frac{0,059 \cdot 4552905,91}{287,08} = 935,7 \text{ К}.$$

Зная теплоту q_1' , находим температуру в точке 3:

$$T_3 = q_1' / c_v + T_2 = 418700 / 700,21 + 935,7 = 1533,66 \text{ К}$$

Зная теплоту q_1'' , находим температуру в точке 4:

$$T_4 = q_1'' / c_p + T_3 = 502440 / 987,29 + 1533,66 = 2042,57 \text{ К}$$

Таблица 3.6

Основные параметры состояния в характерных точках цикла

параметр / точка	1	2	3	4	5
$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	0,88	0,059	0,059		0,88
$T, \text{ К}$	306	935,7	1533,66	2042,57	
$p, \text{ Па}$	100000	4552905,91	$p_4 = p_3$	$p_4 = p_3$	

Третий параметр в точке 3 находим по уравнению состояния:

$$p_3 = \frac{RT_3}{\upsilon} = \frac{287,08 \cdot 1533,66}{0,059} = 7462425,64 \text{ Па}$$

Зная давление $p_4 = p_3$ находим третий параметр в точке 4 по уравнению состояния:

$$\upsilon = \frac{RT_4}{p_4} = \frac{287,08 \cdot 2042,57}{7462425,64} = 0,079 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таблица 3.7

Основные параметры состояния в характерных точках цикла

параметр / точка	1	2	3	4	5
$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	0,88	0,059	0,059	0,079	0,88
$T, \text{ К}$	306	935,7	1533,66	2042,57	
$p, \text{ Па}$	100000	4552905,91	7462425,64	7462425,64	

Параметры в точке 5 рассчитываем аналогично точке 2. Смотрим соседнюю точку 4 (таблица 3.7), в которой известны все основные параметры состояния. В точке 4 объем $v \neq v_5$, поэтому для дальнейшего расчета можно

воспользоваться зависимостями для процесса 4–5, т.е. для адиабатного процесса (приложение 1).

$$\frac{p_5}{p_4} = \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k$$

$$p_5 = p_4 \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k = 7462425,64 \left(\frac{0,079}{0,88} \right)^{1,41} = 249352,45 \text{ Па.}$$

Третий параметр в точке 5 находим по уравнению состояния:

$$T_5 = \frac{v p_5}{R} = \frac{0,88 \cdot 249352,45}{287,08} = 764,35 \text{ К.}$$

Таблица 3.8

Основные параметры состояния в характерных точках цикла

параметр / точка	1	2	3	4	5
$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	0,88	0,059	0,059	0,079	0,88
$T, \text{ К}$	306	935,7	1533,66	2042,57	764,35
$p, \text{ Па}$	100000	4552905,91	7462425,64	7462425,64	249352,45

Для каждого процесса, входящего в цикл, заполняем таблицу 3.9, с учетом первого закона термодинамики (приложение 1) и двух известных теплот ($q_1' = \Delta u_{2-3}$ в процессе 2–3 и q_1'' в процессе 3–4).

Таблица 3.9

Характеристики процессов цикла

параметр / процесс	1-2	2-3	3-4	4-5	5-1
$q, \text{ Дж/кг}$	0	418700	502440	0	$q = \Delta u$
$l, \text{ Дж/кг}$	$l = -\Delta u$	0		$l = -\Delta u$	0
$\Delta u, \text{ Дж/кг}$	$\Delta u = -l$	418700	502440	$\Delta u = -l$	$q = \Delta u$
$\Delta s, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	0			0	

Определяем для каждого процесса, входящего в цикл, оставшиеся величины Δu , Δs , q , l по формулам, приведенным в приложении 1.

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) = 700,21(935,7 - 306) = 440922,24 \text{ Дж/кг};$$

$$\Delta u_{3-4} = c_v(T_4 - T_3) = 700,21(2042,57 - 1533,66) = 356342,87 \text{ Дж/кг};$$

$$\Delta u_{4-5} = c_v(T_5 - T_4) = 700,21(764,35 - 2042,57) = -895023,43 \text{ Дж/кг};$$

$$\Delta u_{5-1} = c_v(T_1 - T_5) = 700,21(306 - 764,35) = -320941,65 \text{ Дж/кг}.$$

Выполняем проверку:

$$\Sigma \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-5} + \Delta u_{5-1}$$

$$\Sigma \Delta u_i = 440922,24 + 418700 + 356342,87 + (-895023,43) + (-320941,65) = 0;$$

Работа, в процессе 3-4 цикла и за весь цикл:

$$l = q - \Delta u$$

$$l_{3-4} = 502440 - 356342,87 = 146097,13 \text{ Дж/кг};$$

$$l_{\text{ц}} = \Sigma l_i = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-1}$$

$$l_{\text{ц}} = -440922,24 + 0 + 146097,13 + 895023,43 + 0 = 600198,32 \text{ Дж/кг}.$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s_{2-3} = c_v \ln \frac{T_3}{T_2} = 700,21 \ln \frac{1533,66}{935,7} = 349,99 \text{ Дж/(кг·К)};$$

$$\Delta s_{3-4} = c_p \ln \frac{T_4}{T_3} = 987,29 \ln \frac{2042,57}{1533,66} = 286,91 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

$$\Delta s_{5-1} = c_n \ln \frac{T_1}{T_5} = 700,21 \ln \frac{306}{764,35} = -638 \text{ Дж/(кг·К)};$$

Выполняем проверку:

$$\Sigma \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-4} + \Delta s_{4-5} + \Delta s_{5-1}$$

$$\Sigma \Delta s_i = 0 + 349,99 + 286,91 + 0 + (-638) = -1,1 \text{ Дж/(кг·К)} \approx 0$$

Полученные результаты представлены в таблице 3.10.

Теплота за весь цикл:

$$q_{\text{ц}} = \Sigma q_i = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-5} + q_{5-1}$$

$$q_{\text{ц}} = 0 + 418700 + 502440 + 0 + (-320941,65) = 600198,35 \text{ Дж/кг}.$$

Характеристики процессов цикла

параметр / процесс	1-2	2-3	3-4	4-5	5-1
q , Дж/кг	0	418700	502440	0	-320941,65
l , Дж/кг	-440922,24	0	146097,13	895023,43	0
Δu , Дж/кг	440922,24	418698	356343	-895023,43	-320941,65
Δs , Дж/(кг·К)	0	349,99	286,91	0	-638

Выполняем проверку:

$$q_{ц} = l_{ц}$$

$$600198,35 \text{ Дж/кг} \approx 600198,32 \text{ Дж/кг}$$

Определяем количеств подведенной и отведенной теплоты.

Подведенная в цикле теплота:

$$q_1 = q_{2-3} + q_{3-4} = 418700 + 502440 = 921140 \text{ Дж/кг.}$$

Отведенная в цикле теплота:

$$q_2 = q_{5-1} = -320941,65 \text{ Дж/кг.}$$

Определяем термический КПД цикла по двум формулам:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{320941,65}{921140} = 0,65;$$

Степень повышения давления:

$$\lambda = p_3/p_2 = 7462425,64 / 4552905,91 = 1,64$$

Степень предварительного расширения:

$$\rho = v_4/v_3 = 0,079 / 0,059 = 1,34$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{[(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]} = 1 - \frac{1}{15^{1,41-1}} \frac{1,64 \cdot 1,34^{1,41} - 1}{[1,64 - 1 + 1,41 \cdot 1,64(1,34 - 1)]} = 0,66$$