

Одним из элементов самостоятельной работы студентов (СРС) является выполнение домашнего задания "Термодинамический расчет газового цикла" по курсу "Термодинамика", используя лекции, учебную литературу и данные методические указания.

В понятие расчета газового цикла входит:

1. Расчет газовой смеси: определение массового состава m_i , кажущейся молекулярной массы смеси $\mu_{см}$, характеристической газовой постоянной смеси $R_{см}$.
2. Определение параметров состояния P, v, T характерных точках цикла.
3. Расчет средних массовых теплоемкостей смеси $C_{pm}^{см}$, и $C_{vm}^{см}$ для каждого процесса.
4. Определение для каждого процесса, входящего в цикл, функций состояния: изменения внутренней энергии Δu , изменения энтальпии Δh , изменения энтропии ΔS и функций процесса: количества подведенного (отведенного) тепла q , термодинамической l и потенциальной w работы.
5. Определение работы цикла $l_{ц}$ и термического коэффициента полезного действия η_r .
6. Построение цикла в $P - V$ и $T - S$ координатах.

Методические указания иллюстрируются примером расчета газового цикла. Все расчеты ведутся в удельных величинах, отнесенных к 1 кг рабочего тела (газовой смеси), которое считается идеальным.

В Приложении 1,2 методических указаний даны составы газовых смесей и 120 вариантов заданий для расчета газового цикла.

При расчете газового цикла используется следующий теоретический материал:

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ связывает между собой основные параметры состояния (P, v, T) и может быть представлено в следующих видах:

а) $Pv = RT$ - для 1 кг газа б) $PV = MRT$ - для M кг газа

в) $P\bar{v} = \bar{R}T$ - для 1 кмоль газа. (1)

где: P - давление, н/м²; V - объем, м³; M - масса, кг; \bar{v} - объем одного киломоля, м³/кмоль; v - объем 1 кг газа, м³/кг; $\bar{R} = 8314$ Дж/КмольК - универсальная газовая постоянная; $R = \bar{R} / \mu$ - характеристическая газовая постоянная, Дж/кг·К; μ - молекулярная масса газа, кг/Кмоль.

ГАЗОВЫЕ СМЕСИ. Рабочим телом большинства тепловых машин является смесь газов. Состав газовой смеси определяется количеством (M_i, V_i) каждого из газов /компонентов/, входящего в смесь, и задается массовым m_i или объемным r_i долями. Формулы для расчета газовых смесей представлены в табл.1.

Таблица №1

Задание состава смеси	Перевод из одного состава в другой	Кажущаяся молекулярная масса смеси	Газовая постоянная смеси
массовые доли $m_i = M_i / M_{см}$	$r_i = \frac{m_i / \mu_i}{\sum_1^n m_i / \mu_i}$	$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n m_i / \mu_i}$	$R_{см} = \sum_1^n m_i R_i$
объемные доли $r_i = V_i / V_{см}$	$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$R_{см} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$

Теплоемкость - это количество тепла, необходимое для изменения температуры единицы количества вещества на один градус. Различают массовую C (Дж/кг·К), объемную C' (Дж/м³·К) и молярную \bar{C} (Дж/кмоль·К) теплоемкости. Теплоемкость газа зависит от температуры. По этому признаку различают среднюю C_m и истинную C теплоемкости. Если q - количество тепла, подведенного (отведенного) к единице количества вещества при изменении его температуры от t_1 до t_2 , то величина $C_m = q / (t_1 - t_2)$ представляет собой среднюю теплоемкость в пределах температур от t_1 до t_2 . Предел этого отношения, когда разность температур стремится к нулю, называют истинной теплоемкостью $C =$

$\delta q/dt$. Для газов важное значение имеют теплоемкости в процессах изохорическом (C_{vm}) и изобарическом (C_{pm}) которые связаны между собой законом Майера $C_{pm} - C_{vm} = R$.

Для вычисления средних теплоемкостей в диапазоне температур от t_1 до t_2 пользуются формулой:

$$C_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{C_m|_0^{t_2} \cdot t_2 - C_m|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

где $C_m|_0^{t_1}$ - средняя теплоемкость газа в интервале температур от 0°C до $t^\circ\text{C}$, она может быть мольной, объемной или массовой как при постоянном давлении так и при постоянном объеме. Средняя массовая теплоемкость смеси определяется:

$$C_m^{см} = \sum_1^n m_i c_{mi} \quad (3)$$

где C_{mi} - средняя массовая теплоемкость i -го компонента (табл.8, 9), n - число компонентов в смеси.

Соотношения между параметрами состояния, расчетные и проверочные зависимости термодинамических величин в процессах

Наименование процесса	Уравнение процесса	Показатель политропы	Связь между параметрами	Термодинамическая работа	Потенциальная работа	Теплоемкость процесса	Количество тепла	Изменение энтропии
Политропный	$PV^n = idem$	$n = \frac{\omega}{l}$	$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$	$l_{1,2} = \frac{P_1V_1 - P_2V_2}{n-1}$ $l_{1,2} = \frac{R(T_1 - T_2)}{n-1}$	$\omega_{1,2} = \frac{P_1V_1 - P_2V_2}{n-1}$ $\omega_{1,2} = \frac{nR(T_1 - T_2)}{n-1}$	$C_n = C_{vm} \frac{n-k}{n-1}$	$q_{1,2} = \Delta U + Al_{1,2}$ $q_{1,2} = \Delta h + A\omega_{1,2}$ $q_{1,2} = C_n(T_2 - T_1)$ $Q = L \frac{k-n}{n-1}$	$\Delta S = C_{vm} \ln \frac{T_2}{T_1} + AR \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\Delta S = C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1} - AR \ln \frac{P_2}{P_1}$ $\Delta S = \left(C_{vm} - \frac{AR}{n-1}\right) \ln \frac{T_2}{T_1}$ $\Delta S = C_n \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изобарный	$P = idem$	$n=0$	$P_1 = P_2$ $\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}$	$l_{1,2} = R(T_2 - T_1)$ $l_{1,2} = P(V_2 - V_1)$	$\omega_{1,2} = 0$	C_{pm}	$q_{1,2} = \Delta U + Al_{1,2}$ $q_{1,2} = \Delta h = C_{pm}(T_2 - T_1)$	$\Delta S = C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изохорный	$V = idem$	$n = \pm\infty$	$V_1 = V_2$ $\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2}{P_1}$	$l_{1,2} = 0$	$\omega_{1,2} = V(P_1 - P_2)$ $\omega_{1,2} = R(T_1 - T_2)$	C_{vm}	$q_{1,2} = C_{vm}(T_2 - T_1)$ $q_{1,2} = T \cdot \Delta S$	$\Delta S = C_{vm} \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изотермический	$PV = idem$	$n=1$	$T_1 = T_2$ $\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2}$	$l_{1,2} = RT \ln \frac{V_1}{V_2}$ $l_{1,2} = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$	$\omega_{1,2} = l_{1,2}$	∞	$q_{1,2} = l_{1,2} = \omega_{1,2}$	$\Delta S = AR_{vm} \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\Delta S = AR_{vm} \ln \frac{P_1}{P_2}$
Адиабатный	$PV^k = idem$	$n = k = \frac{C_{pm}}{C_{vm}}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$	$l_{1,2} = \frac{P_1V_1 - P_2V_2}{k-1}$ $l_{1,2} = \frac{R(T_1 - T_2)}{k-1}$	$\omega_{1,2} = \frac{kR(P_1V_1 - P_2V_2)}{k-1}$ $\omega_{1,2} = \frac{kR(T_1 - T_2)}{k-1}$	0	$q_{1,2} = 0$	$\Delta S = 0$

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. Выражение 1-го начала термодинамики для конечного изменения состояния 1 кг газа имеет вид:

$$q_{12} = \Delta u + l_{12} \quad q_{12} = \Delta h + w_{12} \quad (4)$$

Количество тепла q_{12} , термодинамическая работа $l_{12} = \int_{V_1}^{V_2} P dV$, потенциальная работа $w_{12} = \int_{P_1}^{P_2} -V dP$

являются функциями процесса, формулы для расчета этих величин представлены в табл.2.

Внутренняя энергия u , энтальпия h являются функциями состояния, т.е. изменение этих величин не зависит от пути процесса и определяется по формулам:

$$\Delta u = C_{vm}(t_2 - t_1) \quad \Delta h = C_{pm}(t_2 - t_1) \quad (5)$$

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. Основными процессами, которые изучаются в термодинамике, являются изохорический ($V = idem$), изобарический ($P = idem$), изотермический ($T = idem$) и адиабатный ($PV^k = idem$). Перечисленные процессы - частный случаи обобщающего процесса, который называется политропным и описывается уравнением $PV^n = idem$, где n - показатель политропы, который может иметь любые значения от $-\infty$ до $+\infty$. Зависимость между параметрами состояния в политропном процессе и его частных случаях, а также расчетные и проверочные зависимости термодинамических величин приведены в табл. 2.

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ определяет направление, в котором протекают процессы, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в другие виды, и для обратимых процессов имеет вид:

$$dS = \delta q/T \text{ или } \delta q = T \cdot dS \quad (6)$$

В технической термодинамике приходится иметь дело не с абсолютным значением энтропии, а с её изменением $\Delta S = \int \delta q/T$.

Изменение энтропии ΔS между двумя произвольными точками политропного процесса и его частных случаев определяется по формулам табл. 2.

КРУГОВОЙ ПРОЦЕСС или цикл - это совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние. Степень совершенства цикла характеризуется термическими КПД:

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} \quad (7)$$

Первый закон термодинамики для цикла:

$$\oint \delta q = \oint du + \oint \delta l = \oint dh + \oint \delta w \quad (8)$$

Внутренняя энергия, энтальпия, энтропия являются функциями состояния, поэтому в круговых процессах изменение этих величин равно нулю.

$$\oint du = \sum_1^n \Delta u_i = 0 \quad \oint dh = \sum_1^n \Delta h_i = 0$$

Следовательно, выражение (8) примет вид

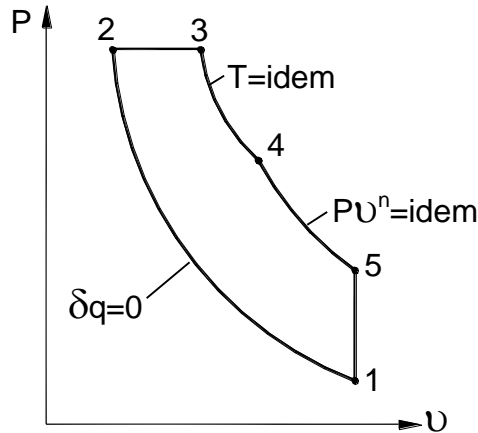
$$l_u = \oint \delta q = \oint \delta l = \oint \delta w \quad l_u = \sum_1^n q_1 = \sum_1^n l_i = \sum_1^n w_i$$

где l_u - работа цикла, Дж/кг; $q_i, l_i, w_i, \Delta u, \Delta h_i$ - соответственно количество подведенного (отведенного) тепла, термодинамическая работа, потенциальная работа, изменение внутренней энергии, изменение энтальпии в процессах, составляющих цикл, Дж/кг; q_1, q_2 - количество подводимого и отводимого тепла в цикле, Дж/кг.

Пример расчета: 1 кг рабочей смеси объемного состава $r_{O_2}=0,23, r_{N_2}=0,55, r_{CO_2}=0,22$ совершает цикл (рис.1). Известны параметры: $P_1=2 \cdot 10^5$ Па, $P_4=8 \cdot 10^5$ Па, $t_1=100$ °С, $t_2=300$ °С, $V_3=0,27$ м³/кг, $n=1,5$.

Определить:

1. Параметры в характерных точках цикла P, v, T .
2. Средние массовые теплоемкости в процессах цикла.
3. Термодинамическую l и потенциальную работу w , теплоту q , изменение внутренней энергии Δu , энтальпии Δh и энтропии ΔS в процессах цикла, работу цикла l_u , термический к.п.д. цикла η_t .



4. Построить цикл в координатах $P-V$ и $T-S$.

Расчет газовой смеси (табл.1)

а) определение массового состава смеси

$$m_{O_2} = \frac{r_{O_2} \cdot \mu_{O_2}}{\sum_1^n r_i \mu_i} = \frac{0,23 \cdot 32}{0,23 \cdot 32 + 0,55 \cdot 28 + 0,22 \cdot 44} = 0,227;$$

$$m_{N_2} = \frac{0,55 \cdot 28}{32,44} = 0,475 \quad m_{CO_2} = \frac{0,22 \cdot 44}{32,44} = 0,298.$$

Проверка: $\sum_1^m m_i = 1$ $0,227 + 0,475 + 0,298 = 1.$

б) определение кажущейся молярной массы смеси

$$\mu_{см} = 1 / \left(\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i} \right) = \frac{1}{0,227/32 + 0,475/28 + 0,298/44} = 32,45 \text{ кг/К·моль.}$$

Проверка: через объемные доли

$$\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i = 0,23 \cdot 32 + 0,55 \cdot 28 + 0,22 \cdot 44 = 32,44 \text{ кг/К·моль.}$$

в) определение газовой постоянной смеси

$$R_{см} = \sum_1^n m_i R_i = 0,227 \cdot 260 + 0,475 \cdot 297 + 0,298 \cdot 189 = 256 \text{ Дж/кг·К,}$$

$R_i = 8314 / \mu_i$, - газовая постоянная компонента.

Проверка: через объемные доли

$$R_{см} = \bar{R} / \mu_{см} = \bar{R}_{см} / \sum_1^n r_i \mu_i = 8314 / 32,44 = 256 \text{ Дж/кг·К} = 0,256 \text{ кДж/кг·К.}$$

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ

Параметры состояния определяют по уравнению процесса, по соотношению между параметрами в процессах (табл.2), если в одной точке процесса известно три параметра, а в другой - один. Уравнение состояния – Клайперона применяют, если в точке известны два параметра из трех и для проверки.

1. V_1 определяется из уравнения Клайперона

$$v_1 = R_{cm} \cdot T_1 / p_1 = 256 \cdot 373 / (2 \cdot 10^5) = 0,477 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. V_2 - из соотношения в адиабатном процессе

$$V_2 / V_1 = (T_1 / T_2)^{\frac{1}{k-1}}, \text{ отсюда } V_2 = V_1 (T_1 / T_2)^{\frac{1}{k-1}},$$

где $k = C_{pm}^{cm} / C_{vm}^{cm}$ - показатель адиабаты.

Для определения $C_{pm}^{cm}|_{t_1}^{t_2}$ и $C_{vm}^{cm}|_{t_1}^{t_2}$ необходимо найти теплоемкости компонентов смеси (табл.8, 9) в интервале от 0°C до $t^\circ\text{C}$.

Диапазон температур	Теплоемкости, кДж/кг·К					
	C_{pmO_2}	C_{pmN_2}	C_{pmCO_2}	C_{vmO_2}	C_{vmN_2}	C_{vmCO_2}
0 - 100	0,923	1,04	0,866	0,663	0,743	0,677
0 - 300	0,95	1,049	0,949	0,69	0,752	0,76

По формуле (3) определяются средние массовые теплоемкости смеси в диапазоне температур от 0°C до 100°C и от 0°C до 300°C , по формуле (2) - в диапазоне температур от 100°C до 300°C .

$$C_{pm}^{cm}|_0^{300} = \sum m_i C_{pm_i}|_0^{300} = m_{O_2} C_{pmO_2}|_0^{300} + m_{N_2} C_{pmN_2}|_0^{300} + m_{CO_2} C_{pmCO_2}|_0^{300} =$$

$$0,227 \cdot 0,950 + 0,475 \cdot 1,049 + 0,298 \cdot 0,949 = 0,996 \text{ кДж/кг·К};$$

$$C_{vm}^{cm}|_0^{300} = \sum m_i C_{vm_i}|_0^{300} = m_{O_2} C_{vmO_2}|_0^{300} + m_{N_2} C_{vmN_2}|_0^{300} + m_{CO_2} C_{vmCO_2}|_0^{300} =$$

$$= 0,227 \cdot 0,960 + 0,475 \cdot 0,752 + 0,298 \cdot 0,760 = 0,740 \text{ кДж/кг·К}.$$

Проверка по закону Майера: $C_{pm}^{cm}|_0^{300} - C_{vm}^{cm}|_0^{300} = R_{cm}$;

$$R_{cm} = 0,256 \text{ кДж/кг·К}; 0,996 - 0,740 = 0,256.$$

$$C_{pm}^{cm}|_0^{100} = 0,227 \cdot 0,923 + 0,475 \cdot 1,040 + 0,298 \cdot 0,866 = 0,961 \text{ кДж/кг·К};$$

$$C_{vm}^{cm}|_0^{100} = 0,227 \cdot 0,663 + 0,475 \cdot 0,743 + 0,298 \cdot 0,667 = 0,705 \text{ кДж/кг·К}.$$

Проверка: $C_{pm}^{cm}|_0^{100} - C_{vm}^{cm}|_0^{100} = R_{cm}$; $0,961 - 0,705 = 0,256 \text{ кДж/кг·К}$;

$$C_{pm}^{cm}|_{100}^{300} = \frac{0,996 \cdot 300 - 0,961 \cdot 100}{300 - 100} = 1,031 \text{ кДж/кг·К};$$

$$C_{vm}^{cm}|_{100}^{300} = \frac{0,740 \cdot 300 - 0,705 \cdot 100}{300 - 100} = 0,757 \text{ кДж/кг·К}.$$

Проверка: $1,031 - 0,757 = 0,256$.

Показатель адиабаты $K = 1,031 / 0,757 = 1,337 \approx 1,34$;

$$v_2 = 0,477 \cdot (373 / 573)^{1/(1,34-1)} = 0,135 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3. p_2 - из соотношений адиабатического процесса 1 – 2

$$p_2 = p_1 (T_2/T_1)^{\frac{k}{k-1}} = 2 \cdot 10^5 \cdot (573/373)^{1/(1.34-1)} = 10,86 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Проверка по уравнению Клайперона: $p_2 = R_{cm} T_2 / v_2 = 0,86 \cdot 10^5 \text{ Па.}$

4. p_3 - по уравнению изобарного процесса 2-3, т.е.

$$p = idem; p_3 = p_2 = 10,86 \text{ Па.}$$

5. T_3 - из соотношения параметров в изобарном процессе

$$T_3/T_2 = v_3 / v_2, \text{ отсюда } T_3 = T_2 \cdot v_3 / v_2 = 573 \cdot 0,27/0,135 = 1146 \text{ К.}$$

Проверка: $T_3 = p_3 v_3 / R_{cm} = 10,86 \cdot 10^5 \cdot 0,27/256 = 1146 \text{ К.}$

6. По уравнению изотермического процесса $T_4 = T_3 = 1146 \text{ К.}$

7. v_4 – из соотношения параметров в изотермическом процессе:

$$P_3/P_4 = v_4 / v_3;$$

$$v_4 = p_3 v_3 / p_4 = 10,86 \cdot 10^5 \cdot 0,27 / (8 \cdot 10^5) = 0,367 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Проверка: $v_4 = R_{cm} T_4 / p_4 = 256 \cdot 1146 / (8 \cdot 10^5) = 0,367 \text{ м}^3/\text{кг.}$

8. В изохорном процессе 5 - 1: $v_5 = v_1 = 0,477 \text{ м}^3/\text{кг.}$

9. T_5 - из соотношения параметров для политропного процесса 4-5:

$$T_5 = T_4 (v_4 / v_5)^{n-1} = 1146 \cdot (0,367/0,477)^{(1,5-1)} = 1004 \text{ К.}$$

10. p_5 - тоже из соотношения параметров:

$$p_5 = p_4 / (v_4 / v_5)^n = 8 \cdot 10^5 (0,367/0,477)^{1,5} = 5,410^5 \text{ Па.}$$

Проверка: $P_5 = R_{cm} T_5 / v_5 = 256 \cdot 1004 / 0,477 = 5,4 \cdot 10^5 \text{ Па.}$

Результаты сводятся в табл. 3. Таблица №3

№ точек	p , Па	v , м ³ /кг	T , К	t , °С
1	$2 \cdot 10^5$	0,477	373	100
2	$10,86 \cdot 10^5$	0,135	573	300
3	$10,86 \cdot 10^5$	0,270	1146	873
4	$8,00 \cdot 10^5$	0,367	1146	873
5	$5,40 \cdot 10^5$	0,477	1004	731

Средние массовые теплоемкости в процессах цикла

Расчет теплоемкостей в процессах цикла ведется аналогично расчету в адиабатном процессе 1-2. Сначала определяются средние массовые теплоемкости компонентов смеси C_{pm_i} и C_{vm_i} в диапазоне от 0°С до температуры точек цикла по табл.8, 9 методом линейной интерполяции, обязательно проверяя расчет по закону Майера, например, для кислорода – в интервале температур от 0°С до 873 °С :

$$C_{pmO_2} \Big|_0^{873} - C_{vmO_2} \Big|_0^{873} = R_{O_2}; R_{O_2} = \bar{R} / \mu_{O_2} = \frac{8,314}{32} = 0,26 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$$

$$1,023 - 0,763 = 0,260$$

После проверки результаты расчета сводятся в табл. 4

Таблица №4

Диапазон температур	Теплоемкости, кДж/кг·К					
	C_{pmO_2}	C_{pmN_2}	C_{pmCO_2}	C_{vmO_2}	C_{vmN_2}	C_{vmCO_2}
0 - 873	1,023	1,105	1,099	0,763	0,808	0,910
0 - 731	1,008	1,090	1,070	0,748	0,793	0,881

Затем рассчитываются средние массовые теплоемкости смеси от 0°С до температур точек цикла по формуле (3) (расчет обязательно проверяется по закону Майера).

Таблица №5

$0^\circ\text{C}-t^\circ\text{C}$	0-100	0-300	0-873	0-731
C_{pm}^{cm} , кДж/кг·К	0,961	0,996	1,084	1,065
C_{vm}^{cm} , кДж/кг·К	0,705	0,740	0,828	0,809

Средние массовые теплоемкости смеси в процессах цикла рассчитываются по формуле (2). Для изотермического процесса 3-4

$$C_{pm}^{cm} = \infty \text{ и } C_{vm}^{cm} = \infty,$$

т.к. изменение температуры равно нулю. Проверив расчет теплоемкости по закону Майера, результаты сводят в табл. 6.

Таблица №6

Процесс	1-2	2-3	4-5	5-1
Диапазон температур	100-300	300-873	873-731	731-100
C_{pm}^{cm} , кДж/кг·К	1,013	1,130	1,182	1,081
C_{vm}^{cm} , кДж/кг·К	0,757	0,874	0,926	0,825

Термодинамическая работа l , потенциальная работа w , изменение внутренней энергии Δu , изменение энтальпии Δh , изменение энтропии ΔS , количество тепла q в процессах цикла

Процесс 1-2, адиабатный $k = 1,34$; $\delta q = 0$

$$\Delta u_{12} = C_{vm}^{cm}(T_2 - T_1) = 0,757(573-373) = 151,4 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta h_{12} = C_{pm}^{cm}(T_2 - T_1) = 1,013(573-373) = 202,6 \text{ кДж/кг}$$

$$l_{12} = \frac{R_{CM}(T_1 - T_2)}{k - 1} = \frac{0,256(373 - 573)}{1,34 - 1} = -150,6 \text{ кДж/кг}$$

$$w_{12} = \frac{kR_{CM}(T_1 - T_2)}{k - 1} = \frac{1,34 \cdot 0,256(373 - 573)}{1,34 - 1} = -201,8 \text{ кДж/кг}$$

$$q_{12} = 0, dS = \delta q/T = 0, \Delta S_{12} = 0, \text{ следовательно, } S_1 = S_2$$

Остальные процессы цикла рассчитываются аналогично, используя формулы табл.2.

Результаты расчетов сведены в табл. 7

Процесс	Δu кДж/кг	Δh кДж/кг	w кДж/кг	l кДж/кг	q кДж/кг	ΔS кДж/кг·К
1-2	151,4	202,6	-201,8	-150,6	0	0
2-3	500,8	647,5	0	146,6	647,4	0,783
3-4	0	0	90,0	90,0	90,0	0,079
4-5	-131,5	-167,8	109,0	72,7	-58,8	-0,055
5-1	-520,6	-682,0	162,0	0	-520,6	-0,817
<i>ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА</i>	$\sum_1^n \Delta u_i =$ =0,1	$\sum_1^n \Delta h_i =$ =0,3	$\sum_1^n w_i =$ =159,2	$\sum_l^n l_i =$ =158,7	$\sum_1^n q_i =$ =158	$\sum_1^n \Delta S_i =$ =-0,01

$$\text{Термический к.п.д. цикла } \eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{579,4}{737,4} = 0,214;$$

$$q_2 = q_{45} + q_{51} = -58,1 - 520,6 = -579,4 \text{ кДж/кг};$$

$$q_1 = q_{34} + q_{23} = 674,4 + 90 = 737,4 \text{ кДж/кг};$$

$$l_{12} = q_1 - |q_2| = 737,4 - 579,4 = 158 \text{ кДж/кг}.$$

Построение цикла в $P-V$ и $T-S$ координатах

При изображении цикла в координатах $P-V$ (рис.2) сначала строятся характерные точки цикла (1, 2, 3, 4, 5) по известным значениям давления и удельного объема. Затем - процессы, изображаемые прямыми линиями - изобарический процесс 2- 3 и изохорический процесс 5-1. Для построения криволинейных процессов - адиабатического 1-2, изотермического 3 - 4 и политропного 4 - 5 - необходимо определить две-три промежуточные точки между характерными точками по уравнению процесса ($pV^k = idem$, $pV = idem$, $pV^n = idem$).

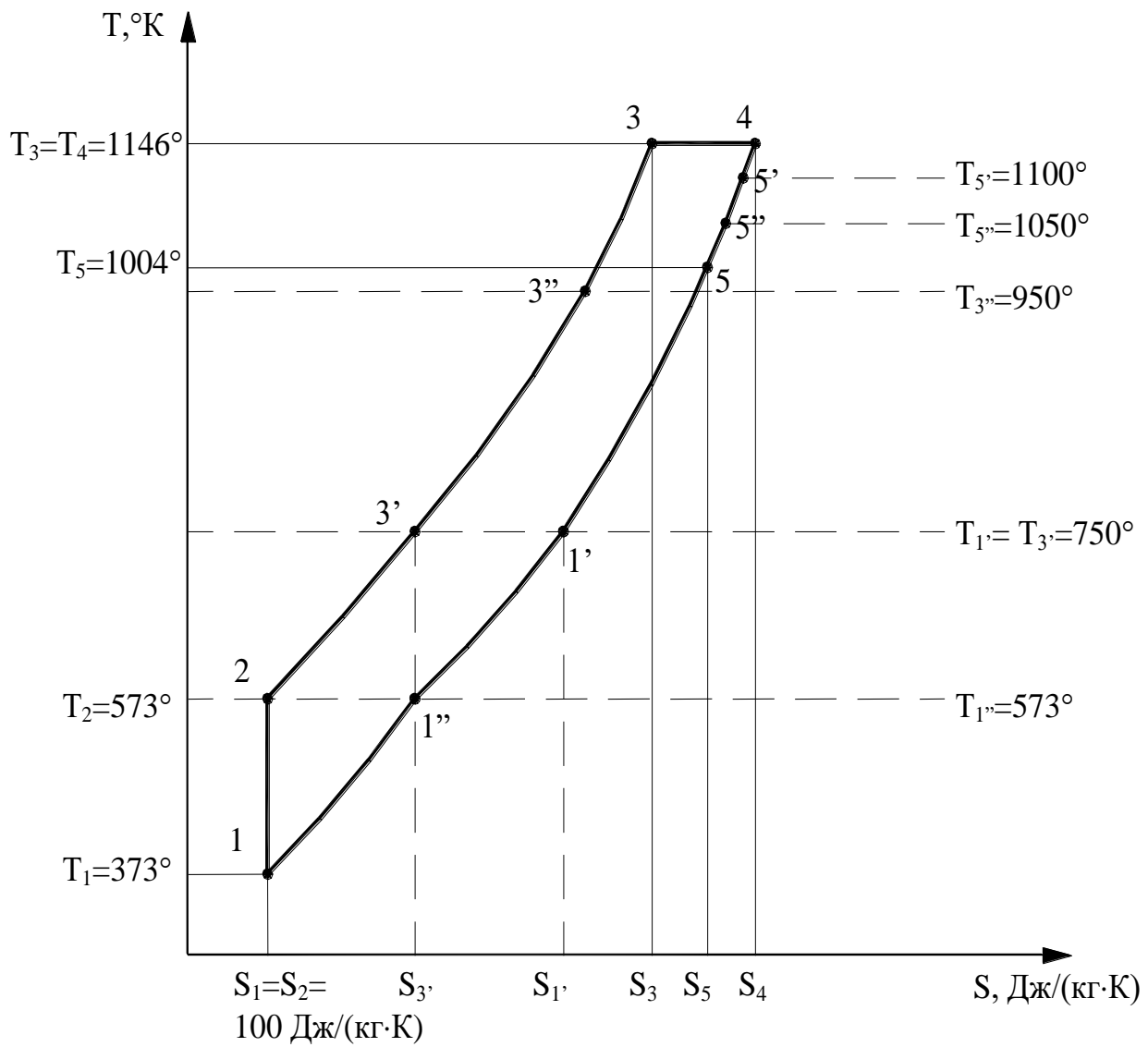
При построении цикла в координатах $T-S$ (рис.3) также сначала строятся характерные точки цикла по значениям T и ΔS . Так как абсолютное значение энтропии неизвестно ни для одной из точек, то энтропия S_1 выбирается произвольно, затем строятся процессы, изображаемые прямыми линиями - изотермический и адиабатный. При построении промежуточных точек криволинейных процессов температуры этих точек задаются, а изменение энтропии определяется по формулам (табл.2). Например, для процесса 4-5 задается промежуточная температура $T_s = 1100 \text{ К}$, а изменение энтропии определяется:

$$\Delta S_{45'} = \ln \frac{T_{5'}}{T_4} \left(C_{V_m}^{cm} - \frac{R_{cm}}{n-1} \right) = \frac{1100}{1400} \left(0,926 - \frac{0,256}{1,5-1} \right) = -0,0169 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К},$$

где $C_{V_m}^{cm}$ - средняя массовая изохорная теплоемкость смеси в процессе 4-5.

Таким образом, используя данные расчета характерных и промежуточных точек, термодинамический цикл изображается в масштабе в P - V и T - S координатах на миллиметровой бумаге (формат А4), (рис.2, 3)

Наименование процесса	Изменение энтропии
Политроп-ный	$\Delta S = C_{vm} \ln \frac{T_2}{T_1} + AR \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\Delta S = C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1} - AR \ln \frac{P_2}{P_1}$ $\Delta S = \left(C_{vm} - \frac{AR}{n-1} \right) \ln \frac{T_2}{T_1}$ $\Delta S = C_n \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изобарный	$\Delta S = C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изохорный	$\Delta S = C_{vm} \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изотерми-ческий	$\Delta S = AR_{vm} \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\Delta S = AR_{vm} \ln \frac{P_1}{P_2}$
Адиабатный	$\Delta S = 0$



(S_1 выбираем произвольно) $S_{1'} = S_2 + \Delta S_{23}$, $S_{1''} = S_1 + \Delta S_{51}$, $S_3 = S_2 + \Delta S_{23}$, $S_5 = S_4 + \Delta S_{45}$
 $S_4 = S_3 + \Delta S_3$

Рис. 2. Расчетный цикл в координатах T - S

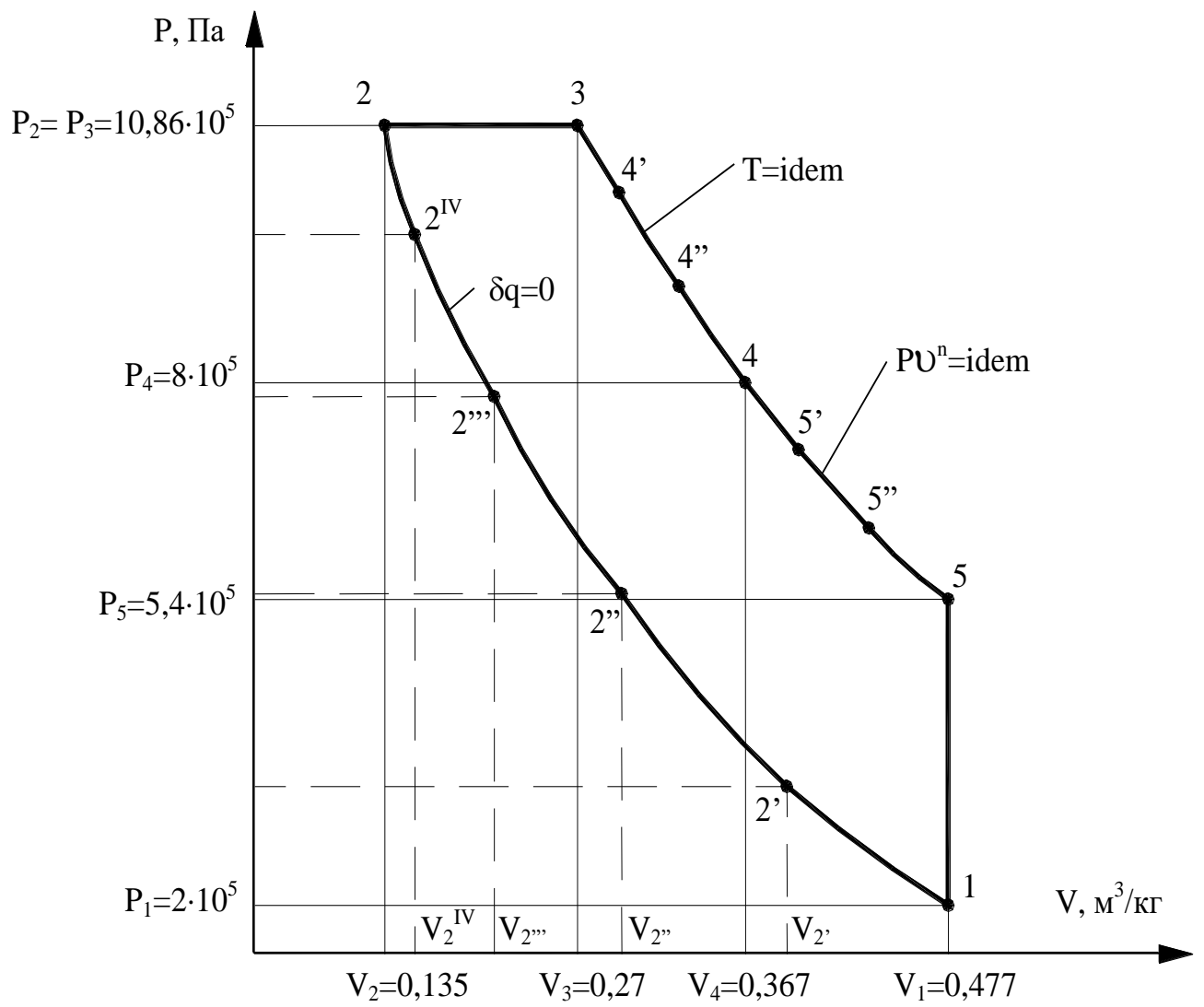


Рис. 3. Расчетный цикл в координатах P - V

Средняя массовая теплоемкость при постоянном давлении
 C_{pm} в диапазоне температур от 0°С до 1°С, кДж/кг·К

Таблица №8

	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	воздух
0	0,915	1,039	1,040	0,815	1,860	1,003
100	0,923	1,040	1,042	0,866	1,873	1,006
200	0,935	1,043	1,046	0,910	1,894	1,011
300	0,950	1,049	1,054	0,949	1,919	1,019
400	0,965	1,057	1,063	0,983	1,948	1,028
500	0,979	1,066	1,075	1,013	1,978	1,039
600	0,993	1,076	1,086	1,040	2,009	1,049
700	1,005	1,087	1,098	1,064	2,042	1,060
800	1,016	1,097	1,109	1,085	2,076	1,071
900	1,026	1,108	1,120	1,105	2,110	1,081
1000	1,035	1,118	1,130	1,122	2,144	1,091
1100	1,043	1,127	1,140	1,138	2,177	1,100
1200	1,051	1,136	1,149	1,153	2,211	1,108
1300	1,058	1,145	1,158	1,166	2,243	1,116
1400	1,065	1,153	1,166	1,178	2,275	1,124
1500	1,071	1,160	1,173	1,190	2,305	1,131
1600	1,077	1,167	1,180	1,200	2,335	1,138
1700	1,083	1,174	1,186	1,209	2,363	1,144
1800	1,089	1,180	1,192	1,218	2,391	1,150
1900	1,094	1,186	1,198	1,226	2,417	1,156
2000	1,099	1,191	1,203	1,233	2,442	1,161
2100	1,104	1,197	1,208	1,241	2,466	1,166
2200	1,109	1,202	1,213	1,247	2,490	1,171
2300	1,114	1,206	1,218	1,253	2,512	1,176
2400	1,118	1,210	1,222	1,259	2,534	1,180
2500	1,123	1,214	1,226	1,264	2,555	1,184
2600	1,127	1,220	1,233	1,272	2,575	1,188
2700	1,132	1,225	1,238	1,277	2,594	1,192
2800	1,137	1,230	1,243	1,283	2,612	1,197
2900	1,142	1,235	1,248	1,288	2,630	1,201
3000	1,147	1,240	1,253	1,294	2,647	1,206

**Средняя массовая теплоемкость при постоянном объеме
 C_{vm} в диапазоне температур от 0 °С до 1 °С, кДж/кг·К**

Таблица №9

	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	воздух
0	0,655	0,742	0,743	0,626	1,398	0,716
100	0,663	0,743	0,745	0,677	1,411	0,719
200	0,675	0,746	0,749	0,721	1,432	0,724
300	0,690	0,752	0,757	0,760	1,457	0,732
400	0,705	0,760	0,766	0,794	1,486	0,741
500	0,719	0,769	0,778	0,824	1,516	0,752
600	0,733	0,779	0,789	0,851	1,547	0,762
700	0,745	0,790	0,801	0,875	1,580	0,773
800	0,756	0,800	0,812	0,896	1,614	0,784
900	0,766	0,811	0,823	0,916	1,648	0,794
1000	0,775	0,821	0,833	0,933	1,682	0,804
1100	0,783	0,830	0,843	0,949	1,715	0,813
1200	0,791	0,839	0,852	0,964	1,749	0,821
1300	0,798	0,848	0,861	0,977	1,781	0,829
1400	0,805	0,856	0,869	0,989	1,813	0,837
1500	0,811	0,863	0,876	1,001	1,843	0,844
1600	0,817	0,870	0,883	1,011	1,873	0,851
1700	0,823	0,877	0,889	1,020	1,901	0,857
1800	0,829	0,883	0,895	1,029	1,929	0,863
1900	0,834	0,889	0,901	1,037	1,955	0,874
2000	0,839	0,894	0,906	1,044	1,980	0,879
2100	0,844	0,900	0,911	1,052	2,005	0,884
2200	0,849	0,905	0,916	1,058	2,028	0,889
2300	0,854	0,909	0,921	1,064	2,050	0,893
2400	0,858	0,913	0,925	1,070	2,072	0,897
2500	0,863	0,917	0,929	1,075	2,093	0,897
2600	0,867	0,923	0,936	1,083	2,113	0,897
2700	0,872	0,928	0,941	1,088	2,132	0,
2800	0,877	0,933	0,946	1,094	2,150	0,91
2900	0,882	0,938	0,951	1,099	2,168	0,91
3000	0,887	0,943	0,956	1,105	2,185	0,91

Состав газовых смесей

Компоненты смеси	H ₂ O	CO ₂	O ₂	См.№1
% содержание по объему	60	20	20	
Молекулярная масса μ	18,01	44	32	
Компоненты смеси	CO ₂	N ₂	O ₂	См.№2
% содержание по объему	15	50	35	
Молекулярная масса, μ	44	28,01	32	
Компоненты смеси	воздух	CO ₂	N ₂	См.№3
% содержание по объему	30	20	50	
Молекулярная масса, μ	28,98	44	28,01	
Компоненты смеси	воздух	CO ₂	N ₂	См.№4
% содержание по объему	60	20	20	
Молекулярная масса, μ	28,98	44	28,01	

Термодинамический цикл 1

Вариант		Политропа		Адиабата			Смесь
		Изотерма		Изобара		Изохора	
		1	2	3	4	5	
1	P		1000000		5000000		1
	V			0,1	0,135		
	T					1500	
2	P		1000000		5000000		1
	V			0,11	0,135		
	T					1500	
3	P		1000000	4900000			1
	V						
	T			1900	2600	1500	
4	P		1000000		5100000		1
	V						
	T			1890	2600	1500	
5	P		1000000	5200000			1
	V			0,11	0,135		
	T					1500	
6	P		1000000		5050000		1
	V			0,11	0,138		
	T					1500	
7	P		1000000	4950000			2
	V				0,14		
	T			1910		1500	
8	P		1000000		4950000		2
	V				0,133		
	T			1915		1500	
9	P		1000000	4900000			2
	V						
	T			1900	2600	1500	
10	P		1000000		5100000		2
	V						
	T			1890	2600	1500	
11	P		1000000	4900000			3
	V						
	T			1900	2600	1500	
12	P		1000000		5100000		3
	V						
	T			1890	2600	1500	
13	P		1000000	5200000			3
	V			0,11	0,135		
	T					1500	
14	P		1000000		5050000		3
	V			0,11	0,138		
	T					1500	
15	P		1000000	5100000			3
	V			0,11			
	T				2600	1500	

Показатель политропы: 1,43

Продолжение прил. 2

Вариант		Политропа		Адиабата			Смесь
		Изотерма		Изобара		Изохора	
		1	2	3	4	5	
16	P		1000000		5050000		3
	V			0,11			
	T				2600	1500	
17	P		1000000	5100000			4
	V			0,11			
	T				2600	1500	
18	P		1000000		5050000		4
	V			0,11			
	T				2600	1500	
19	P		1000000	5200000			4
	V			0,11	0,135		
	T					1500	
20	P		1000000		5050000		4
	V			0,11	0,138		
	T					1500	

Показатель политропы: 1,43

Термодинамический цикл 2

Вариант		Адиабата		Изотерма			Смесь	
		Изобара		Изохора		Политропа		
		1	2	3	4	5		1
1	P	140000			5050000		140000	2
	V					1,11		
	T		640	1275				
2	P		130000		5200000			2
	V					1,29		
	T		640	1280				
3	P					600000		2
	V				0,11			
	T		645	1200	2610			
4	P					610000		2
	V			0,11				
	T		650	1220	2590			
5	P		139000		5090000			2
	V	1,92					1,92	
	T		635	1275				
6	P		140000		5100000			2
	V	1,87					1,87	
	T		640	1270				
7	P			3500000		600000		2
	V				0,11			
	T		640		2600			
8	P			3600000		615000		2
	V			0,1				

	T		655		2600		
Показатель политропы: 2,6							

Продолжение прил. 2

Вариант		Адиабата			Изотерма			Смесь
		Изобара		Изохора		Политропа		
		1	2	3	4	5	1	
9	P					600000		3
	V				0,11			
	T		645	1200	2610			
10	P					610000		3
	V			0,11				
	T		650	1220	2590			
11	P		139000		5090000			3
	V	1,92					1,92	
	T		635	1275				
12	P		140000		5100000			3
	V	1,87					1,87	
	T		640	1270				
13	P			3600000		615000		3
	V			0,1				
	T		655		2610			
14	P			3500000		600000		3
	V				0,11			
	T		640		2600			
15	P	137000			5100000		137000	3
	V	1,86					1,86	
	T		640	1280				
16	P	136000			5100000		136000	3
	V	1,88					1,88	
	T		638	1275				
17	P			3600000		615000		4
	V			0,1				
	T		655		2600			
18	P			3500000		600000		4
	V				0,11			
	T		640		2600			
19	P	137000			5100000		137000	4
	V	1,86					1,86	
	T		640	1280				
20	P	136000			5100000		136000	4
	V	1,88					1,88	
	T		638	1275				
Показатель политропы: 2,6								

Термодинамический цикл 3

Вариант		Изотерма			Адиабата			Смесь
		Изобара		Изохора		Политропа		
		1	2	3	4	5	1	

1	P	140000					140000	1
	V		0,98	0,10				
	T				2100	1435		
Показатель политропы: 2								

Продолжение прил. 2

Вариант		Изотерма			Адиабата			Смесь
		Изобара		Изохора		Политропа		
		1	2	3	4	5	1	
2	P							1
	V	1,05	1,03	0,10			1,05	
	T				2060	1430		
3	P				5500000			1
	V	1,09					1,09	
	T			525	2100	1440		
4	P	138000			4500000		138000	1
	V							
	T			525	2100	1430		
5	P							2
	V	1,05	1,03	0,10			1,05	
	T				2060	1430		
6	P	140000					140000	2
	V		0,98	0,10				
	T				2100	1435		
7	P	140000			5400000		140000	2
	V							
	T		525		2100	1435		
8	P				5400000			2
	V	1,06					1,06	
	T		525		2060	1430		
9	P				5500000			2
	V	1,09					1,09	
	T			525	2100	1440		
10	P	138000			4500000		138000	2
	V							
	T			525	2100	1430		
11	P				5500000			3
	V	1,09					1,09	
	T			525	2100	1440		
12	P	138000			4500000		138000	3
	V							
	T			525	2100	1430		
13	P	140000			5400000		140000	3
	V							
	T		525		2100	1435		
14	P				5400000			3
	V	1,06					1,06	
	T		525		2060	1430		
15	P	138000			4500000		138000	4
	V							
	T			525	2100	1430		
16	P				5500000			4

	V	1,09					1,09	
	T			525	2100	1440		
17	P	140000			5400000		140000	4
	V							
	T		525		2100	1435		
Показатель политропы: 2								

Продолжение прил. 2

Вариант		Изотерма			Адиабата			Смесь
		Изобара		Изохора		Политропа		
		1	2	3	4	5	1	
18	P				5400000			4
	V	1,06					1,0	
	T		525		2060	1430		
19	P				5400000			1
	V			0.10				
	T	550	525			1435	550	
20	P				5500000			1
	V			0.10				
	T	560		525		1430	560	
Показатель политропы: 2								

Термодинамический цикл 4

Вариант		Изотерма			Политропа			Смесь
		Изобара		Изохора		Адиабата		
		1	2	3	4	5	1	
1	P				3050000			3
	V					0,40		
	T	610		500	1980		610	
2	P				2900000	520000		3
	V							
	T	620		500	1980		620	
3	P				3000000			4
	V					0,40		
	T	600	500		2000		600	
4	P				3100000	500000		4
	V							
	T	605	500		2000		605	
5	P				2900000	520000		2
	V							
	T	620		500	1980		620	
6	P				3050000			2
	V					0,40		
	T	610		500	1980		610	
7	P				3050000			1
	V					0,40		
	T	610		500	1980		610	
8	P				2900000	520000		1
	V							

	T	620		500	1980		620	
9	P				3050000			4
	V					0,40		
	T	610		500	1980		610	
10	P				2900000	520000		4
	V							
	T	620		500	1980		620	
Показатель политропы: 2								

Продолжение прил. 2

Вариант		Изотерма			Политропа			Смесь
		Изобара		Изохора		Адиабата		
		1	2	3	4	5	1	
11	P				3050000			3
	V					0,40		
	T	610		500	1980		610	
12	P				2900000	520000		3
	V							
	T	620		500	1980		620	
13	P							1
	V		0,77	0,16		0,40		
	T	630			2020		630	
14	P					530000		1
	V		0,75	0,162				
	T	595			2020		595	
15	P				2900000	520000		2
	V							
	T	620		500	1980		620	
16	P				3050000			2
	V					0,40		
	T	610		500	1980		610	
17	P				3000000			3
	V					0,40		
	T	600	500		2000		600	
18	P				3100000	500000		3
	V							
	T	605	500		2000		605	
19	P				3000000			4
	V					0,40		
	T	600	500		2000		600	
20	P				3100000	500000		4
	V							
	T	605	500		2000		605	
Показатель политропы: 2								

Термодинамический цикл 5

Вариант		Адиабата		Изотерма			Смесь	
		Изобара		Политропа		Изохора		
		1	2	3	4	5		1
1	P	100000					100000	1
	V	2,48	1,55				2,48	

	T			1190	2210			
2	P	102000					102000	1
	V		1,54					
	T	825		1195	2205		825	
3	P	96000				275000	96000	1
	V		1,58					
	T			1215	2220			
Показатель политропы: 10								

Продолжение прил. 2

Вариант		Адиабата		Изотерма			Смесь	
		Изобара		Политропа		Изохора		
		1	2	3	4	5		1
4	P	98000					98000	1
	V		1,56			2,45		
	T			1225	2215			
5	P		10000					1
	V	2,45	1,64				2,45	
	T			1230	2230			
6	P		102000					1
	V		1,62					
	T	800		1210	2225		800	
7	P	96000				275000	96000	2
	V		1,58					
	T			1215	2220			
8	P	98000					98000	2
	V		1,56			2,45		
	T			1225	2215			
9	P		98000					2
	V		1,66			2,4		
	T			1220	2235	22000		
10	P		95000					2
	V		1,6	1200	2240			
	T							
11	P							2
	V		1,62					
	T	800		1210	2225		800	
12	P		100000					2
	V	2,45	1,64				2,45	
	T			1230	2230			
13	P		10000					3
	V	2,45	1,64				2,45	
	T			1230	2230			
14	P		102000					3
	V		1,62					
	T	800		1210	2225		800	
15	P		95000			220000		3
	V		1,6					
	T			1200	2240			
16	P		98000					3
	V		1,66			2,4		

	T			1220	2235			
17	P		100000					4
	V	2,45	1,64				2,45	
	T			1230	2230			
18	P		102000					4
	V		1,62					
	T	800		1210	2225		800	
19	P		95000			220000		4
	V		1,6					
	T			1200	2240			
Показатель политропы: 10								

Продолжение прил. 2

Вариант		Адиабата		Изотерма			Смесь	
		Изобара		Политропа		Изохора		
		1	2	3	4	5		1
20	P		98000				4	
	V		1,66			2,4		
	T			1220	2235			
Показатель политропы: 10								

Термодинамический цикл 6

Вариант		Политропа		Изотерма			Смесь	
		Изобара		Адиабата		Изохора		
		1	2	3	4	5		1
1	P	94000					94000	1
	V	2,25	2				2,25	
	T			1020	1450			
2	P					163000		1
	V		2,1					
	T	880		1020	1475		880	
3	P					175000		1
	V		2,05					
	T	885		975		1520	885	
4	P	104000					104000	1
	V	2,28	2,05				2,28	
	T			970	1480			
5	P	96000					96000	2
	V		2			2,2		
	T			1000	1500			
6	P	98000				168000	98000	2
	V		2					
	T			1000	1500			
7	P	96000					96000	2
	V		2			2,2		
	T			1000	1500			
8	P	98000				168000	98000	2
	V		2					
	T			100	1500			
9	P							2

	V	2,3	2,1				2,3	
	T	870		1030	1550		870	
10	P							2
	V		2,1			2,25		
	T	875		1030	1525		875	
11	P	94000					94000	3
	V	2,25	2				2,25	
	T			1020	1450			
12	P					163000		3
	V		2,1					
	T	880		1020	1475		880	
Показатель политропы: 2								

Продолжение прил. 2

Вариант		Политропа			Изотерма			Смесь
		Изобара		Адиабата		Изохора		
		1	2	3	4	5	1	
13	P	94000					94000	3
	V	2,25	2				2,25	
	T			1020	1450			
14	P					163000		3
	V		2,1					
	T	880		1020	1475		880	
15	P	98000				168000	98000	3
	V		2					
	T			1000	1500			
16	P	96000					96000	3
	V		2			2,2		
	T			1000	1500			
17	P	98000				168000	98000	4
	V		2					
	T			1000	1500			
18	P	96000					96000	4
	V		2			2,2		
	T			1000	1500			
19	P	104000					104000	4
	V	2,28	2,05				2,28	
	T			970	1480			
20	P					175000		4
	V		2,05					
	T	885,000		975		1520	885	
Показатель политропы: 2								

Примечание: P- давление (Па);
V- удельный объем (м³/ кг);
T- температура (К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.
«Техническая термодинамика» -М.: Энергоатомиздат, 1983 г.
2. Архаров А.М., Исаев С.И. и др. «Теплотехника»
(под редакцией Крутова В.И.) М.Машиностроение, 1988 г.
3. Поршаков Б.П., Бикчентай Б.А., Романов Р.Н.
Термодинамика и теплопередача в технологических процессах
Нефтяной и газовой промышленности «Учебник для вузов – М.:
Недра, 1987 г.
4. «Теплотехника» Учебник для вузов.
(под редакцией Баскакова А.П.) М.: Энергоиздат, 1982 г.