

## Задания по Теплотехнике.

В данном пособии приведены задачи по теплотехнике для студентов очного и заочного обучения. Здесь же представлены примеры решения задач №1-5. Пример решения задачи №6 рассмотрен в методическом пособии «Теплотехника» автор: Булатов С.Ю., НГИЭИ, 2012. С. 75-89.

Выполненная работа представляется в печатном виде на листах формата А4; шрифт Times new Roman; поля по 2 см.; отступ 1,25; межстрочный интервал 1,5. Возможно рукописное исполнение на тетради в клетку. При этом важно уделить внимание точности построения графиков. Титульный лист распечатывается отдельно и крепится снаружи.

Структура работы должна включать титульный лист с номером варианта, содержание, основную часть, список литературы.

Для работы на практических занятиях и самостоятельных расчетов студентам необходимо иметь рабочую тетрадь в клетку, чертежные принадлежности, инженерный калькулятор.

## Задача № 1

Задан объемный состав газовой смеси:  $r_{\text{CH}_4}$ ,  $r_{\text{CO}_2}$ ,  $r_{\text{CO}}$ . Определить массовый и мольный составы смеси, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, удельный объём и плотность смеси при давлении смеси  $p$  и температуре смеси  $t$ . Определить также массовую, объемную и мольную теплоемкость смеси. При этом считать теплоемкость не зависящей от температуры, а мольные теплоемкости компонентов соответственно равны:

$$(\mu c_p)_{\text{CH}_4} = 37,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$(\mu c_p)_{\text{CO}_2} = 37,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$(\mu c_p)_{\text{CO}} = 29,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Массовая  $c$  и объёмная  $c'$  теплоемкости связаны с мольной соответственно соотношениями:

$$c = \frac{(\mu c_p)}{\mu} \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$c' = \frac{(\mu c_p)}{22,4} \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Данные для расчета принять по табл. 1.1.

Таблица 1.1

Данные к задаче № 1

Вариант	$r_{\text{CH}_4}$	$r_{\text{CO}_2}$	$r_{\text{CO}}$	$P$ , МПа	$t$ , °С
1	2	3	4	5	6
1	0,10	0,60	0,30	0,10	0
2	0,15	0,50	0,35	0,15	10
3	0,20	0,40	0,40	0,20	20
4	0,25	0,50	0,25	0,25	30
5	0,30	0,60	0,10	0,30	40
6	0,35	0,50	0,15	0,35	50
7	0,40	0,40	0,20	0,40	60
8	0,45	0,30	0,25	0,35	70
9	0,50	0,20	0,30	0,30	80

1	2	3	4	5	6
10	0,55	0,10	0,35	0,25	90
11	0,60	0,10	0,30	0,20	100
12	0,65	0,20	0,15	0,15	90
13	0,65	0,25	0,10	0,10	80
14	0,60	0,20	0,20	0,15	70
15	0,50	0,10	0,40	0,20	60
16	0,50	0,20	0,30	0,25	50
17	0,40	0,30	0,30	0,30	40
18	0,40	0,40	0,20	0,35	30
19	0,30	0,30	0,40	0,40	20
20	0,30	0,40	0,30	0,45	10

### Пример решения задачи № 1

**Исходные данные:**

$$r_{\text{CH}_4} = 0,13; r_{\text{CO}_2} = 0,27; r_{\text{CO}} = 0,6; p = 0,12 \text{ МПа}; t = 70^\circ \text{C}.$$

#### Решение

Находим молекулярную массу компонентов смеси:

$$\mu_{\text{CH}_4} = \mu_{\text{C}} + 4\mu_{\text{H}} = 12 + 4 = 16 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}};$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = \mu_{\text{C}} + 2\mu_{\text{O}} = 12 + 2 \cdot 16 = 44 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}};$$

$$\mu_{\text{CO}} = \mu_{\text{C}} + \mu_{\text{O}} = 12 + 16 = 28 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}.$$

Находим кажущуюся молекулярную массу смеси:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{см}} &= \mu_{\text{CH}_4} r_{\text{CH}_4} + \mu_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{CO}} r_{\text{CO}} = \\ &= 16 \cdot 0,13 + 44 \cdot 0,27 + 28 \cdot 0,6 = 30,76 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}. \end{aligned}$$

Определим массовые доли компонентов смеси:

$$m_{\text{CH}_4} = \frac{(\mu_{\text{CH}_4} r_{\text{CH}_4})}{\mu_{\text{см}}} = \frac{(16 \cdot 0,13)}{30,79} = 0,068;$$

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{(\mu_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2})}{\mu_{\text{см}}} = \frac{(44 \cdot 0,27)}{30,79} = 0,386;$$

$$m_{\text{CO}} = \frac{(\mu_{\text{CO}} r_{\text{CO}})}{\mu_{\text{см}}} = \frac{(28 \cdot 0,6)}{30,79} = 0,546.$$

Проверка:

$$m_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CO}} = 0,068 + 0,386 + 0,546 = 1.$$

Находим мольные доли компонентов смеси.

Так как мольный состав смеси совпадает с объёмным, то мольные доли равны:

$$n_{\text{CH}_4} = r_{\text{CH}_4} = 0,13;$$

$$n_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} = 0,27;$$

$$n_{\text{CO}} = r_{\text{CO}} = 0,6.$$

Газовая постоянная смеси

$$R_{\text{см}} = \frac{R_0}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{30,76} = 270,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

где  $R_0 = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$  – универсальная газовая постоянная.

Удельный объем смеси находим, используя уравнение состояния идеального газа:

$$p \vartheta_{\text{см}} = RT = R(t + 273);$$

$$\vartheta_{\text{см}} = \frac{R(t + 273)}{p} = \frac{270,3 \cdot (70 + 273)}{0,12 \cdot 10^6} = 0,773 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Плотность смеси

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\vartheta_{\text{см}}} = \frac{1}{0,773} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Мольная изобарная теплоемкость смеси

$$(\mu c_p)_{\text{см}} = (\mu c_p)_{\text{CH}_4} r_{\text{CH}_4} + (\mu c_p)_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + (\mu c_p)_{\text{CO}} r_{\text{CO}} =$$

$$= 37,7 \cdot 0,13 + 37,7 \cdot 0,27 + 29,3 \cdot 0,6 = 32,66 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Массовая изобарная теплоемкость

$$c_{p \text{ см}} = \frac{(\mu c_p)_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{32,66}{30,76} = 1,06 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Объемная изобарная теплоемкость

$$c'_{p\text{см}} = \frac{(\mu c_p)_{\text{см}}}{22,4} = \frac{32,66}{22,4} = 1,46 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

Мольная изохорная теплоемкость смеси

$$(\mu c_v)_{\text{см}} = (\mu c_p)_{\text{см}} - R_0 = 32,66 - 8,314 = 24,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Массовая изохорная теплоемкость смеси

$$c_{v\text{см}} = \frac{(\mu c_v)_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{24,35}{30,76} = 0,791 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Объемная изохорная теплоемкость смеси

$$c'_{v\text{см}} = \frac{(\mu c_v)_{\text{см}}}{22,4} = \frac{24,35}{22,4} = 1,087 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

**Ответ:**  $m_{\text{CH}_4} = 0,068$ ;  $m_{\text{CO}_2} = 0,386$ ;  $m_{\text{CO}} = 0,546$ ;  $n_{\text{CH}_4} = 0,13$ ;

$$n_{\text{CO}_2} = 0,27$$
;  $n_{\text{CO}} = 0,6$ ;  $R_{\text{см}} = 270,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $\rho_{\text{см}} = \frac{1}{0,773} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$$\mu_{\text{см}} = 30,79 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$
;  $(\mu c_p)_{\text{см}} = 32,66 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ ;  $c_{p\text{см}} = 1,06 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

$$c'_{p\text{см}} = 1,46 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$
;  $c_{v\text{см}} = 0,791 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $(\mu c_v)_{\text{см}} = 24,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ ;

$$c'_{v\text{см}} = 1,087 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

## Задача № 2

Для отопления гаража используют трубу, по которой протекает горячая вода. Рассчитать конвективный коэффициент теплоотдачи и конвективный тепловой поток от трубы к воздуху в гараже, если наружный диаметр и длина трубы соответственно равны  $d_n$  и  $l$ . Температура поверхности трубы  $t_c$ , при этом температура воздуха в гараже должна составлять  $t_b$ . Данные для расчета принять по табл. 2.1. Теплофизические свойства воздуха определить по табл. 2.2.

Таблица 2.1

Данные к задаче № 2

Вариант	$d_n$ , м	$l$ , м	$t_c$ , °C	$t_b$ , °C
1	0,10	10	70	15
2	0,15	9	75	16
3	0,20	8	80	17
4	0,15	7	85	18
5	0,10	6	90	19
6	0,12	7	85	20
7	0,14	8	80	19
8	0,16	9	75	18
9	0,18	10	70	17
10	0,20	9	75	16
11	0,18	8	80	15
12	0,16	7	85	14
13	0,14	6	90	15
14	0,12	7	85	16
15	0,10	8	80	17
16	0,12	9	75	18
17	0,14	10	70	19
18	0,16	9	75	20
19	0,18	8	80	21
20	0,20	7	85	22

Таблица 2.2

## Теплофизические свойства воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^{-6}, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$Pr$
-50	1,584	1,013	2,04	17,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,2	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	20,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687

## Пример решения задачи № 2

### Исходные данные:

$d_n = 0,20$  м;  $l = 5$  м;  $t_c = 92$  °С;  $t_B = 16$  °С.

Задание: определить конвективный тепловой поток от трубы к воздуху в гараже.

### Решение

Тепловой поток на наружной поверхности трубы  $Q$  (Вт), передаваемый к воздуху, определяется как

$$Q = \alpha(t_c - t_B)F, \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха около трубы,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;  $F$  – площадь наружной поверхности трубы,  $\text{м}^2$ .

Критериальная зависимость для вычисления среднего коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха имеет вид

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (2.2)$$

где постоянные  $C$  и  $n$  зависят от режима свободного движения воздуха и условий обтекания поверхности. Они являются функциями  $Gr \cdot Pr$  и для горизонтальной трубы определяются по табл. 2.3 .

Таблица 2.3

Значения постоянных  $C$  и  $n$

$Gr \cdot Pr$	$C$	$n$	Режим движения
$1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^9$	0,5	0,25	Ламинарный
$\geq 6 \cdot 10^{10}$	0,15	0,333	Турбулентный

$Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$  – критерии подобия Нуссельта, Грасгофа, Прандтля:

$$Nu = \frac{(\alpha \cdot d_n)}{\lambda}; \quad Gr = \frac{g \cdot \beta(t_c - t_B) \cdot d_n^3}{\nu^2},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м<sup>2</sup>/с;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха,  $\beta = \frac{1}{(t_B + 273)} \cdot \frac{1}{\text{К}}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

В формуле (2.2) все физические свойства, входящие в критерии подобия, выбираются из табл. 2.2 при определяющей температуре воздуха  $t_b$  вдали от поверхности теплообмена, а в качестве определяющего размера – наружный диаметр трубы  $d_n$ .

В рассматриваемом случае определяющая температура  $t_b = 16^\circ\text{C}$ .

При этой температуре для воздуха:

$$\lambda = 0,0256 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad \nu = 14,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad Pr = 0,704;$$

$$\beta = \frac{1}{(t_b + 273)} = \frac{1}{(16 + 273)} = 3,46 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{К}}.$$

Вычисляем значение комплекса:

$$\begin{aligned} Gr \cdot Pr &= \frac{g \cdot \beta (t_c - t_b) \cdot d^3}{\nu^2} \cdot Pr = \\ &= \frac{9,81 \cdot 3,46 \cdot 10^{-3} \cdot (92 - 16) \cdot 0,2^3}{(14,7 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,704 = 6,723 \cdot 10^7. \end{aligned}$$

Из табл. 2.3 находим, что при вычисленном значении комплекса постоянные в расчетном уравнении (2.2) равны:  $C = 0,5$  и  $n = 0,25$ . Тогда значение критерия Нуссельта составит

$$Nu = 0,5 \cdot (6,723 \cdot 10^7)^{0,25} = 45,27.$$

Откуда

$$\alpha = Nu \cdot \left( \frac{\lambda}{d} \right) = 45,27 \cdot \left( \frac{0,0256}{0,2} \right) = 5,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Площадь наружной поверхности трубы

$$F = \pi d_n l = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 5 = 3,14 \text{ м}^2.$$

Тогда тепловой поток, отдаваемый от наружной поверхности трубы к воздуху по формуле (2.1), будет равен

$$Q = 5,8 \cdot (92 - 16) \cdot 3,14 = 1384,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

**Ответ:**  $Q = 1384,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$

### Задача № 3

Задан состав твердого топлива на рабочую массу в %. Определить теоретически необходимое количество воздуха для горения, а также по формуле Д.И. Менделеева – низшую и высшую теплоту сгорания топлива, объемы и состав продуктов сгорания при  $\alpha_v$ , а также энтальпию продуктов сгорания при температуре  $\vartheta$ . Данные для расчета принять по табл. 3.1.

Таблица 3.1

Данные к задаче № 3

Вариант	$W^p$	$A^p$	$S^p$	$C^p$	$H^p$	$N^p$	$O^p$	$\alpha_v$	$\vartheta, ^\circ\text{C}$
1	13,0	21,8	3,0	49,3	3,6	1,0	8,3	1,1	120
2	14,0	25,8	3,9	44,8	3,4	1,0	7,1	1,2	130
3	8,0	23,0	3,2	55,2	3,8	1,0	5,8	1,3	140
4	11,0	26,7	3,1	49,2	3,4	1,0	5,6	1,4	150
5	9,0	34,6	3,2	44,0	3,1	0,8	5,3	1,3	160
6	12,0	13,2	0,3	58,7	4,2	1,9	9,7	1,2	170
7	8,5	11,0	0,5	66,0	4,7	1,8	7,5	1,1	180
8	9,0	18,2	0,3	61,5	3,7	1,5	5,8	1,2	190
9	6,5	16,8	0,4	68,6	3,1	1,5	3,1	1,3	200
10	7,0	30,7	0,7	53,6	3,0	1,6	3,4	1,4	210
11	14,0	9,5	0,5	59,5	4,0	1,5	11,0	1,5	220
12	10,0	13,5	0,5	67,7	3,6	1,6	5,3	1,6	230
13	12,0	18,9	0,4	59,1	3,4	1,7	4,5	1,5	240
14	32,0	25,2	2,7	28,7	2,2	0,6	8,6	1,4	250
15	5,5	23,6	0,8	59,6	3,8	1,3	5,4	1,3	260
16	10,0	19,8	2,6	55,5	3,7	0,9	7,5	1,2	270
17	6,0	31,0	6,1	48,5	3,6	0,8	4,0	1,1	280
18	18,0	29,5	1,0	37,3	2,8	0,9	10,5	1,2	290
19	8,0	23,9	0,4	60,3	2,5	0,9	4,0	1,3	300
20	8,0	9,2	0,6	67,9	4,7	0,8	8,8	1,4	310

Таблица 3.2

## Энтальпии газов, воздуха и золы

$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$(c\vartheta)_{\text{CO}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{N}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c\vartheta)_{\text{B}}$	$(c\vartheta)_{\text{ЗЛ}}$
	кДж / м <sup>3</sup>				кДж / кг
100	171,1	130,1	150,5	132,7	80,8
200	360,0	261,0	304,0	267,0	169,1
300	563	394	463	403	264
400	776	529	626	542	360
500	999	667	795	685	458
600	1231	808	969	830	560
700	1469	952	1149	979	662
800	1712	1098	1334	1129	767
900	1961	1247	1526	1283	857
1000	2210	1398	1723	1483	984
1100	2458	1551	1925	1595	1097
1200	2717	1705	2132	1754	1206
1300	2977	1853	2344	1914	1361
1400	3239	2009	2559	2076	1583
1500	3503	2166	2779	2239	1759
1600	3769	2324	3002	2403	1876
1700	4036	2484	3229	2567	2064
1800	4305	2644	3458	2732	2186
1900	4574	2804	3690	2899	2387
2000	4844	2965	3926	3066	2512
2100	5115	3127	4163	3234	-
2200	5386	3289	4402	3402	-
2300	5658	3452	4643	3571	-
2400	5930	3615	4888	3740	-
2500	6203	3778	5132	3910	-

### Пример решение задачи № 3

#### Исходные данные:

$$W^P = 13,2; \quad A^P = 22,8; \quad S^P = 3,1; \quad C^P = 50,0; \quad H^P = 3,8; \quad N^P = 1,2; \\ O^P = 5,9; \quad \alpha_s = 1,2; \quad \vartheta = 200 \text{ }^\circ\text{C}.$$

#### Решение

Теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг топлива вычисляется по формуле

$$V^0 = 0,089C^P + 0,226H^P + 0,033(S^P - O^P) = \\ = 0,089 \cdot 50,0 + 0,226 \cdot 3,8 + 0,033(3,1 - 5,9) = 5,2 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Действительное необходимое количество воздуха

$$V_d = \alpha_B V^0 = 1,2 \cdot 5,2 = 6,2 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Низшая теплота сгорания 1 кг топлива по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_H^P = 338C^P + 1025H^P - 108,5(O^P - S^P) - 25 \cdot W^P = \\ = 338 \cdot 50,0 + 1025 \cdot 3,8 - 108,5 \cdot (5,9 - 3,1) - 25 \cdot 13,2 = 20161 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Высшая теплота сгорания

$$Q_B^P = Q_H^P + 225H^P + 25W^P = 20161 + 225 \cdot 3,8 + 25 \cdot 13,2 = 21346 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Теоретические объемы продуктов полного сгорания твердых топлив при  $\alpha_B=1$  определяются по формулам:

-объем трехатомных газов

$$V_{\text{RO}_2} = 0,0187(C^P + 0,375S^P) = 0,0187(50,0 + 0,375 \cdot 3,1) = 0,96 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

-объем азота

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^P}{100} = 0,79 \cdot 5,2 + 0,8 \frac{1,2}{100} = 4,12 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

-объем сухих газов

$$V_{CG}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 = 0,96 + 4,12 = 5,08 \frac{M^3}{кг};$$

-объем водяных паров

$$\begin{aligned} V_{H_2O}^0 &= 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,0161V^0 = \\ &= 0,111 \cdot 3,8 + 0,0124 \cdot 13,2 + 0,0161 \cdot 5,2 = 0,67 \frac{M^3}{кг}. \end{aligned}$$

Полный объем газообразных продуктов сгорания 1 кг топлива при  $\alpha_B = 1$

$$V_{\Gamma}^0 = V_{CG}^0 + V_{H_2O}^0 = 5,08 + 0,67 = 5,75 \frac{M^3}{кг}.$$

Объем продуктов сгорания при  $\alpha_B = 1,2$  определяется по формулам:

-объем сухих газов

$$V_{CG} = V_{CG}^0 + (\alpha_B - 1)V^0 = 5,08 + (1,2 - 1) \cdot 5,2 = 6,12 \frac{M^3}{кг};$$

-объем водяных паров

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_B - 1) \cdot V^0 = 0,67 + 0,0161(1,2 - 1) \cdot 5,2 = \\ &= 0,69 \frac{M^3}{кг}. \end{aligned}$$

Полный объем продуктов сгорания

$$V_{\Gamma} = V_{CG} + V_{H_2O} = 6,12 + 0,69 = 6,81 \frac{M^3}{кг}.$$

Энтальпия продуктов сгорания,  $\frac{кДж}{кг}$ , при  $\alpha_B = 1$  и температуре газов  $\vartheta = 200$  °С находится по формуле

$$H_{\Gamma}^0 = V_{CO_2} (c\vartheta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c\vartheta)_{H_2O}, \quad (3.1)$$

где  $(c\vartheta)_{CO_2}$ ,  $(c\vartheta)_{N_2}$ ,  $(c\vartheta)_{H_2O}$  – энтальпия соответственно  $1 м^3$  углекислого газа, азота и водяных паров (находится по табл. 3.2 при  $\vartheta = 200$  °С):

$$(c\vartheta)_{\text{CO}_2} = 357 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$$

$$(c\vartheta)_{\text{N}_2} = 260 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$$

$$(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}} = 304 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Подставляя найденные значения энтальпии в уравнение (3.1), получаем

$$H_{\Gamma}^0 = 0,96 \cdot 357 + 4,12 \cdot 260 + 0,67 \cdot 304 = 1617,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия воздуха,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ,

$$H_{\text{B}}^0 = V^0 (c\vartheta)_{\text{B}},$$

где  $(c\vartheta)_{\text{B}}$  – энтальпия воздуха при  $\vartheta = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. табл. 3.2).

$$H_{\text{B}}^0 = 5,2 \cdot 266 = 1383,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия продуктов сгорания при  $\alpha_{\text{B}} = 1,2$  и  $\vartheta = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\text{B}} - 1)H_{\text{B}}^0 = 1617,6 + (1,2 - 1)1383,2 = 1894,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

**Ответ:**  $V^0 = 5,2 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ;  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 20161 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;  $Q_{\text{B}}^{\text{P}} = 21346 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;

$$V_{\text{RO}_2} = 0,96 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; V_{\text{N}_2}^0 = 4,12 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; V_{\text{CF}}^0 = 5,08 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,67 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$V_{\text{CF}} = 6,12 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; V_{\text{CF}} = 6,12 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,69 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; H_{\Gamma}^0 = 1617,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$H_{\text{B}}^0 = 1383,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; H_{\Gamma} = 1894,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

#### Задача № 4

Определить литровую мощность и удельный индикаторный расход топлива четырехцилиндрового ( $i = 4$ ) четырехтактного ( $\tau = 4$ ) двигателя, если среднее индикаторное давление равно  $P_i$  (Па). Диаметр цилиндра  $D = 0,12$  м, ход поршня  $S = 0,1$  м, угловая скорость вращения коленчатого вала  $\omega$ , (рад/с), механический  $\eta_m$  и удельный расход топлива  $g = 0,008$  кг/с.

Данные для расчета принять по табл. 4.1.

Таблица 4.1

Данные к задаче № 4

Вариант	$P_i$ , МПа	$\omega$ , рад/с	$\eta_m$
1	0,80	377	0,80
2	0,85	398	0,81
3	0,90	419	0,82
4	0,95	440	0,83
5	1,00	471	0,84
6	1,05	492	0,85
7	1,10	502	0,86
8	1,15	513	0,87
9	1,20	523	0,88
10	1,15	461	0,89
11	1,10	450	0,90
12	1,05	429	0,89
13	1,00	408	0,88
14	0,95	387	0,87
15	0,90	481	0,86
16	0,85	534	0,85
17	0,80	544	0,84
18	0,85	419	0,83
19	0,90	440	0,82
20	0,95	471	0,81

### Пример решения задачи № 4

#### Исходные данные:

$P_i = 8,5 \cdot 10^5$  Па;  $\omega = 419$  рад/с;  $\eta_m = 0,83$ ;  $g = 0,008$  кг/с;  $D = 0,12$  м;  $S = 0,1$  м.

#### Решение

Находим рабочий объем цилиндра:

$$V_h = \frac{\pi D^2 S}{4} = 3,14 \cdot 0,12^2 \cdot \frac{0,1}{4} = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Частота вращения коленчатого вала

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{419}{2 \cdot 3,14} = 66,7 \text{ с}^{-1}.$$

Индикаторная мощность двигателя  $N_i = \frac{2P_i V_h n i}{10^3 \tau}$ ,

где  $i$  – число цилиндров двигателя,  $i=4$ ;  $\tau$  – тактность двигателя, для четырехтактного двигателя  $\tau = 4$ .

$$\text{Тогда } N_i = \frac{2 \cdot 8,5 \cdot 10^5 \cdot 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 66,7 \cdot 4}{10^3 \cdot 4} = 120 \text{ кВт}.$$

Эффективная мощность двигателя

$$N_e = N_i \eta_m = 120,6 \cdot 0,83 = 100 \text{ кВт}.$$

Литровая мощность двигателя

$$N_l = \frac{N_e}{i V_h} = \frac{100}{4 \cdot 1,13 \cdot 10^{-3}} = 22124 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}.$$

Удельный индикаторный расход топлива

$$g_i = \frac{3600 B}{N_i} = \frac{3600 \cdot 0,008}{120} = 0,239 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

**Ответ:**  $N_l = 22124 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$ ;  $g_i = 0,239 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ .

## Задача № 5

Одноцилиндровый одноступенчатый поршневой компрессор сжимает воздух от атмосферного давления  $p_1 = 0,1$  МПа до требуемого давления  $p_2$ . Определить эффективную мощность привода компрессора и необходимую мощность электродвигателя с запасом 10 % на перегрузку, если диаметр цилиндра  $D$  (м), ход поршня  $S$  (м), частота вращения вала  $N$  (об/с), относительный объем вредного пространства  $\delta = 0,05$ , показатель политропы расширения остающегося во вредном объеме газа  $m$ , коэффициент, учитывающий, уменьшение давления газа при всасывании,  $\eta_p = 0,94$  и эффективный адиабатный КПД компрессора  $\eta_{е.ад} = 0,75$ .

Данные для расчета принять по табл. 5.1.

Таблица 5.1

Данные к задаче № 5

Вариант	$P_2$ , МПа	$D$ , м	$S$ , м	$N$ , об/с	$m$
1	0,50	0,10	0,10	6,67	1,30
2	0,55	0,12	0,12	7,00	1,35
3	0,60	0,15	0,15	7,50	1,33
4	0,65	0,17	0,17	7,92	1,37
5	0,70	0,20	0,20	8,33	1,34
6	0,75	0,17	0,17	8,83	1,33
7	0,80	0,15	0,15	9,17	1,35
8	0,85	0,12	0,12	9,67	1,36
9	0,90	0,10	0,10	10,00	1,37
10	0,95	0,12	0,12	10,33	1,30
11	1,00	0,15	0,15	11,33	1,35
12	0,95	0,17	0,17	11,67	1,33
13	0,90	0,15	0,15	12,00	1,37
14	0,85	0,12	0,12	12,50	1,34
15	0,80	0,10	0,10	12,00	1,35
16	0,75	0,13	0,13	11,67	1,30
17	0,70	0,15	0,15	11,33	1,31
18	0,65	0,18	0,18	10,83	1,33
19	0,60	0,20	0,20	10,00	1,32
20	0,55	0,17	0,17	9,17	1,30

## Пример решения задачи № 5

### Исходные данные:

$P_1 = 0,1 \text{ МПа}; P_2 = 0,75 \text{ МПа}; D = 0,12 \text{ м}; S = 0,12 \text{ м}; n = 12 \text{ об/с};$   
 $\delta = 0,05; m = 1,33; \eta_p = 0,94; \eta_{\text{е.ад}} = 0,75.$

### Решение

Определяем степень повышения давления

$$\lambda = \frac{P_2}{P_1} = \frac{0,75}{0,1} = 7,5.$$

Объёмный КПД компрессора

$$\eta_{\text{об}} = 1 - \delta \left( \lambda^{\frac{1}{m}} - 1 \right) = 1 - 0,05 \left( 7,5^{\frac{1}{1,33}} - 1 \right) = 0,772.$$

Коэффициент подачи компрессора

$$\eta_v = \eta_{\text{об}} \cdot \eta_p = 0,772 \cdot 0,94 = 0,726.$$

Теоретическая подача компрессора

$$V_T = \frac{\pi D^2}{4} S \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,12^2}{4} \cdot 0,12 \cdot 12 = 0,0163 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Действительная подача компрессора

$$V = V_T \eta_v = 0,0163 \cdot 0,726 = 0,0118 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Теоретическая мощность привода компрессора при адиабатном сжатии

$$N_{\text{ад}} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1 \cdot V}{10^3} \left( \lambda^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,0118}{10^3} \left( 7,5^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) =$$

$$= 3,21 \text{ кВт}.$$

Эффективная мощность привода компрессора

$$N_e = \frac{N_{\text{ад}}}{\eta_{\text{е.ад}}} = \frac{3,21}{0,75} = 4,29 \text{ кВт}.$$

Необходимая мощность электродвигателя с 10 %-ным запасом перегрузки

$$N_{\text{эд}} = 1,1 N_e = 1,1 \cdot 4,29 = 4,7 \text{ кВт}.$$

**Ответ:**  $N_e = 4,29 \text{ кВт}; N_{\text{эд}} = 4,7 \text{ кВт}.$

## Задача №6

Цикл отнесен к 1 кг воздуха. Принимаем:

$$c_p = 1,005 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}; c_v = 0,71 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}; R = 287 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}.$$

Требуется:

- 1) определить параметры  $p$ ,  $v$ ,  $T$ ,  $u$ ,  $h$  для основных точек цикла;
- 2) построить цикл: а) в координатах  $lgv - lgp$ ;  
б) в координатах  $p-v$ ;  
в) в координатах  $T-s$ .

В координатах  $p-v$  и  $T-s$  каждый процесс должен быть построен по двум-трем промежуточным точкам;

3) найти  $n$ ,  $s$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta s$ ,  $q$ ,  $l$ ,  $a$ ,  $b$  для каждого процесса входящего в состав цикла;

5) определить работу цикла  $l_{ц}$ , термический КПД и среднее индикаторное давление  $p_i$ ;

б) полученные данные поместить в таблицу 2

При выполнении задания следует обратить внимание на физический смысл величин и их размерности в системах единиц МКГСС и СИ.

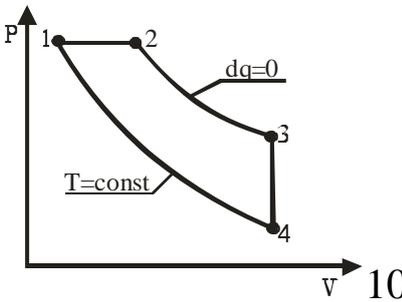
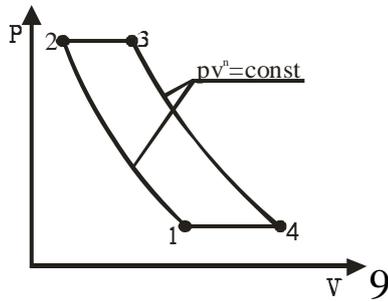
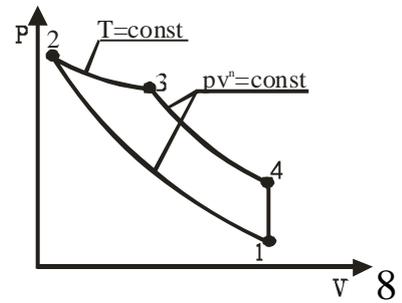
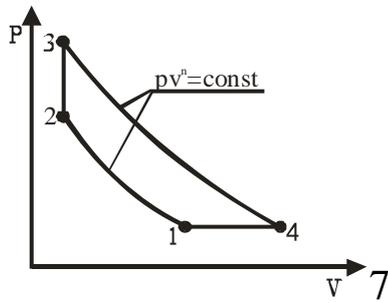
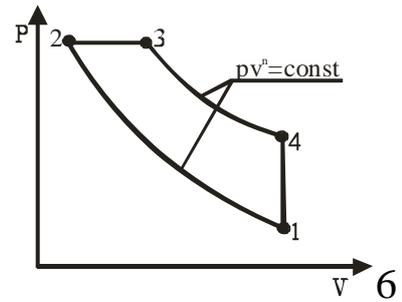
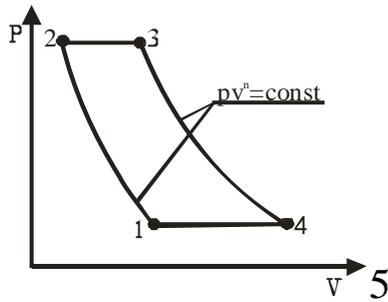
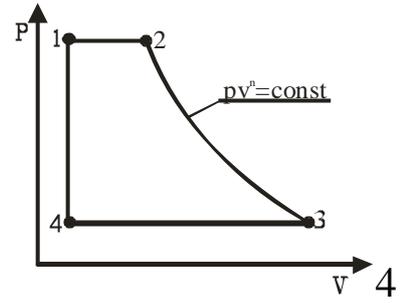
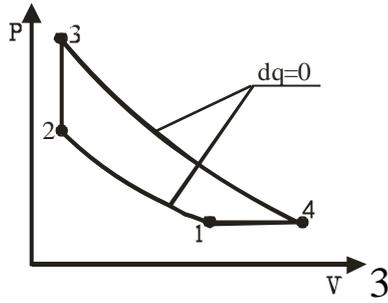
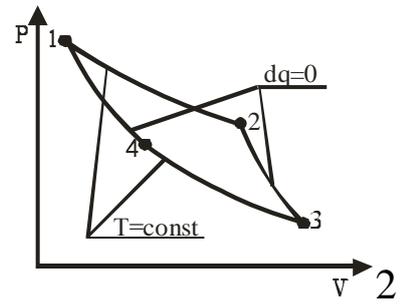
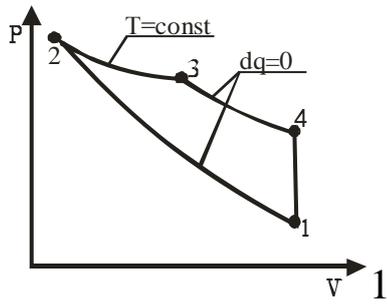
Примечания:

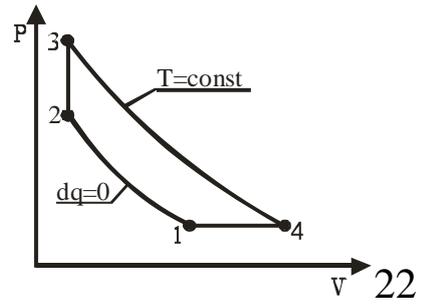
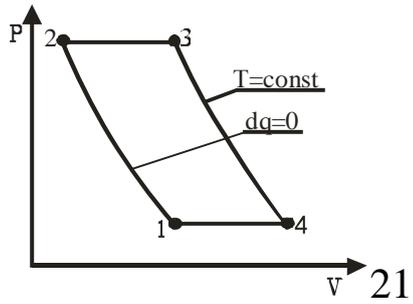
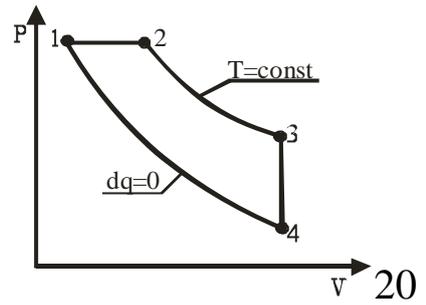
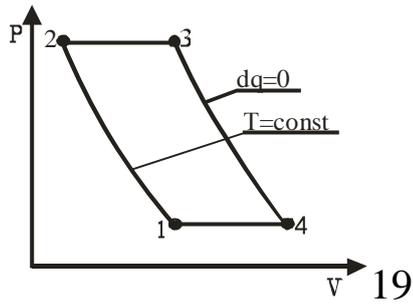
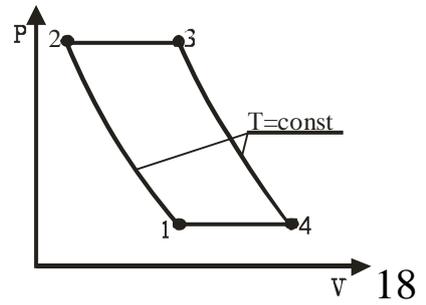
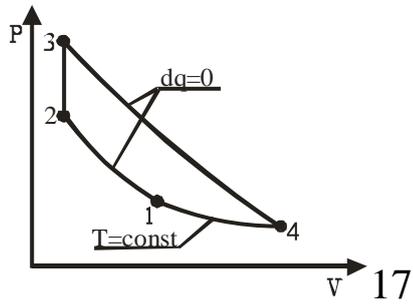
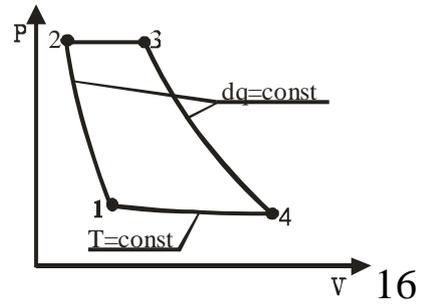
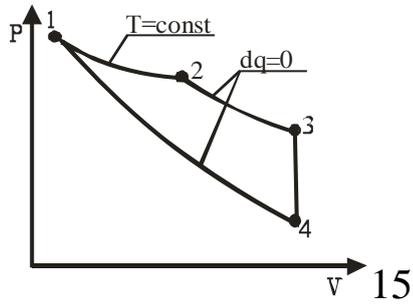
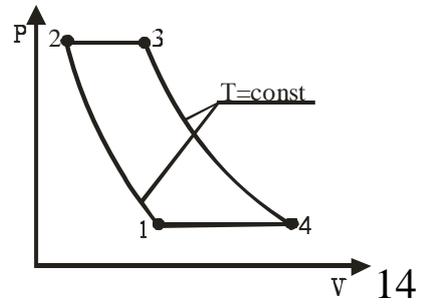
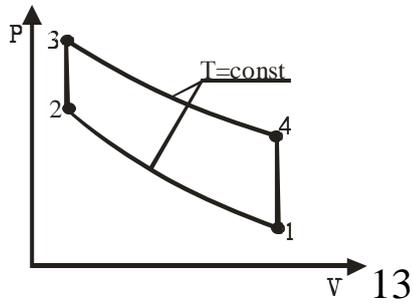
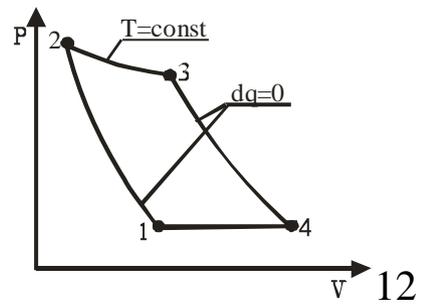
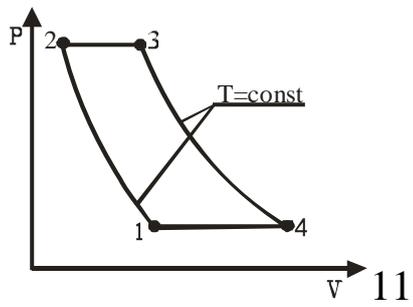
- данные к заданию составлены в форме таблицы 2 и циклов, изображенных в координатах  $p-v$ , без учета масштаба.

- номер задания (столбец 1 табл. 6.1. ) выбирается по таблице согласно номеру зачетной книжки (столбец 2 табл. 6.1. ). Номер изображения цикла в координатах  $p-v$  соответствует номеру задания.

- пример решения задачи рассмотрен в методическом пособии «Теплотехника» автор: Булатов С.Ю., НГИЭИ, 2012. С. 75-89.

## Данные к задаче





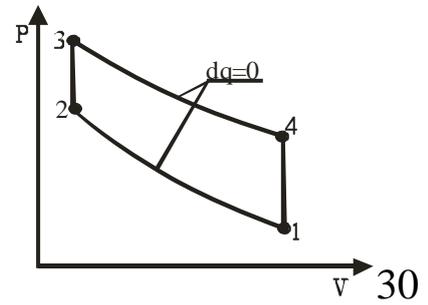
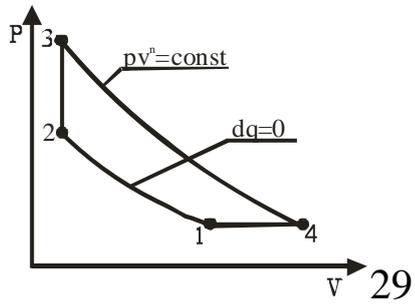
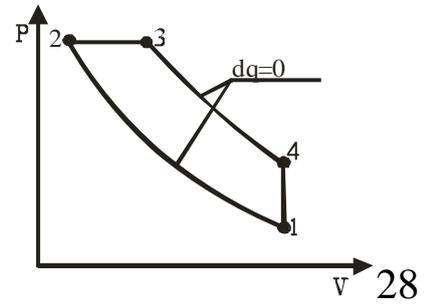
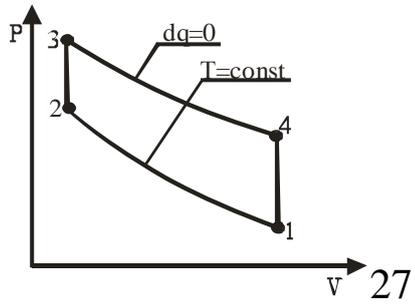
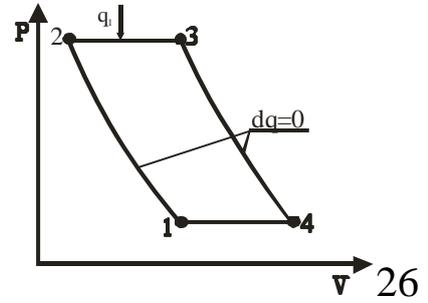
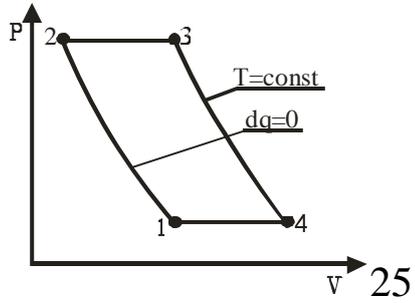
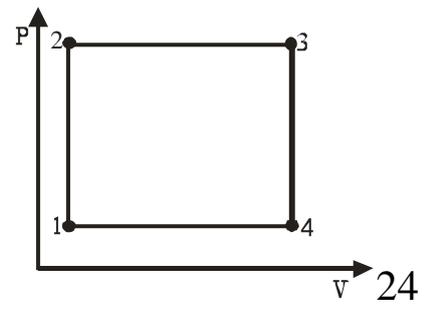
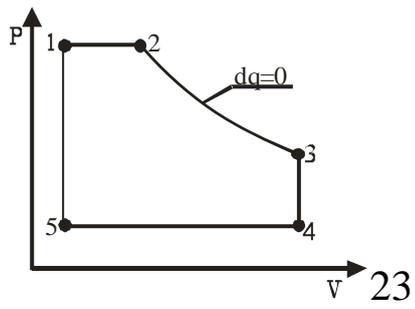


Таблица 6.1. Исходные данные

Последние две цифры зачетной книжки	№ задания	P <sub>1</sub> , МПа	P <sub>2</sub> , МПа	P <sub>3</sub> , МПа	P <sub>4</sub> , МПа	t <sub>1</sub> , °С	t <sub>2</sub> , °С	t <sub>3</sub> , °С	t <sub>4</sub> , °С	v <sub>1</sub> , м <sup>3</sup> /кг	v <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /кг	v <sub>3</sub> , м <sup>3</sup> /кг	v <sub>4</sub> , м <sup>3</sup> /кг	n	q <sub>1</sub> , кДж/кг
00;30; 32; 64; 96	1	0,8	2	1,2	-	0,12	-	-	-	-	-	-	-		-
01; 31;33; 65; 97	2	1,3	0,5	-	-	300	-	17	-	-	-	-	-		-
02; 34;62; 66; 98	3	0,2	1,2	-	-	-	-	300	-	0,45	-	-	-		-
03; 35; 63;67; 99	4	3,5	-	0,4	-	210	300	-	-	-	-	-	-	1,2	-
04; 36; 68; 94	5	0,1	0,5	-	-	0	-	200	-	-	-	-	-	1,3	-
05; 37; 69; 95	6	0,09	0,4	-	-	30	-	200	-	-	-	-	-	1,2	-
06; 38; 70	7	1,6	-	2,5	-	-	150	-	-	0,5	-	-	-	1,2	-
07; 39; 71	8	0,18	-	0,3	-	30	-	-	-	-	0,1	-	-	1,1	-
08; 40; 72	9	0,3	2	-	-	-	-	300	-	0,3	-	-	-	1,3	-
09; 41; 73	10	2-	-	-	-	200	350	-	-	-	-	-	0,12	-	-
10; 42; 74	11	0,2	2	-	-	50	-	200	-	-	-	-	-	-	-
11; 43; 75	12	0,4	1,6	0,6	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12; 44; 76	13	0,3	0,8	-	-	27	-	200	-	-	-	-	-	-	-
13; 45; 77	14	1,2	3,0	-	-	100	200	-	-	-	-	-	-	-	-
14; 46; 78	15	5	1,8	-	-	300	-	-	-	-	-	0,2	-	-	-
15; 47; 79	16	0,7	2	-	-	-	-	200	-	0,12	-	-	-	-	-
16; 48; 80	17	0,3	0,6	-	-	30	-	250	-	-	-	-	-	-	-
17; 49; 81	18	0,12	-	-	-	-	-	150	-	0,7	0,2	-	-	-	-
18; 50; 82	19	0,4	1	-	-	-	-	300	-	0,3	-	-	-	-	-
19; 51; 83	20	0,7	-	-	-	200	300	-	-	-	-	-	0,4	-	-
20; 52; 84	21	0,3	1	-	-	25	-	250	-	-	-	-	-	-	-
21; 53; 85	22	0,3	1	-	-	-	-	200	-	0,3	-	-	-	-	-
22; 54; 86	23	1	-	-	0,6	250	300	-	-	-	-	0,2	-	-	-
23; 55; 87	24	1,2	1,4	-	-	-	-	150	-	0,08	-	-	-	-	-
24; 56; 88	25	-	2,5	-	-	50	-	300	-	0,12	-	-	-	-	-
25; 57; 89	26	0,12	0,8	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	24
26; 58; 90	27	0,08	-	-	-	20	-	300	-	-	0,4	-	-	-	-
27; 59; 91	28	1,2	6	-	-	50	-	320	-	-	-	-	-	-	-
28; 60; 92	29	0,1	-	-	-	0	160	-	65	-	-	-	-	1,3	-
29; 61; 93	30	0,3	1,8	-	-	20	-	330	-	-	-	-	-	-	-