

**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»  
БРОННИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра общетехнических дисциплин

Утверждаю  
Зав.кафедрой  
общетехнических дисциплин  
\_\_\_\_\_ Авуза А.Н.

**Решения задач размещены  
на сайте [zadachi24.ru](http://zadachi24.ru)**

**В. И. ЕРЕМИН**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО  
ДИСЦИПЛИНЕ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

БРОННИЦЫ 2017

## **1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.**

Выполнение самостоятельной работы студентов имеет задачи:  
закрепить и углубить знания, полученные в результате изучения теоретического и практического курса по Термодинамике и теплопередаче;  
научить студентов применению этих знаний к решению практических задач расчета тепловых процессов в помещениях, устройствах, агрегатах и тепловых машинах.

Цель выполнения курсовой работы – закрепить теоретический материал курса «Термодинамики и теплопередачи» и применить его для расчетов тепловых машин.

В процессе работы студенты должны проявить самостоятельность, творческий подход к решаемым задачам, научиться работать с литературой.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ И СТРУКТУРА РАБОТЫ**

Содержание самостоятельной работы определяется ее заданием, которое выдается преподавателем каждому обучаемому индивидуально, в соответствии с сформированными вариантами для каждой из практических задач.

Студент должен уяснить задание, подобрать и изучить рекомендованную литературу, материал лекций и практических занятий и в соответствии с приведенными примерами выполнить свою работу.

Самостоятельная работа состоит из решения следующих практических задач на темы, изучаемые в теоретическом курсе дисциплине:

1. Законы и уравнения для смесей идеальных газов и их характеристики
2. Конвективный теплообмен и теплоотдача.
3. Тепловые расчеты при горении твердого топлива.
4. Определение внешних характеристик тепловых двигателей.
5. Определение характеристик одноступенчатого поршневого компрессора.

б. Расчет циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Самостоятельная работа выполняется на листах формата А4 с оформлением титульного листа установленной формы с указанием номера варианта.

При оформлении решений задач в обязательном порядке записывается текстовое условие задачи и подробное ее решение с пояснениями из теоретической части соответствующих разделов дисциплины.

Варианты заданий для решения выбираются в соответствии с порядковым номером записи студента в журнале группы. Для студентов под номером в журнале №21 и далее, для задач с 1 по 5 выбираются номера вариантов начиная с №1.

Для задачи №6 выбираются варианты до №25 в соответствии с порядковым номером записи студента в журнале группы. Задача №6 выполняется по исходным данным, представленным в соответствующем варианте, **но ход решения, а также определяемые параметры, функции и строятся графики в соответствии с общим условием и порядком расчетов приведенным в примере выполнения к данному заданию №6.**

Текст пояснительной записки может быть выполнен разборчивым рукописным подчерком или с использованием компьютера и принтера через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков – не менее 1,8 мм (кегель 14). Решение каждой задачи необходимо начинать с нового листа. Листы выполненной работы должны иметь порядковые номера в пределах всей работы.

### 3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ И МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ

#### 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 объем 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 объемная  $c'$  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 молярные доли компонентов смеси.

Так как молярный состав смеси совпадает с объёмным, то молярные 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 объём 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

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

Молярная 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  $d_{\text{н}}$  и  $l$ . Температура поверхности трубы  $t_{\text{с}}$ , при этом температура воздуха в гараже должна составлять  $t_{\text{в}}$ . Данные для расчета принять по табл. 2.1. Теплофизические свойства воздуха определить по табл. 2.2.

Таблица 2.1

Данные к задаче № 2

Вариант	$d_{\text{н}}$ , м	$l$ , м	$t_{\text{с}}$ , °C	$t_{\text{в}}$ , °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

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^{-6}, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$Pr$
-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<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха,  $\beta = \frac{1}{(t_b + 273)}$ ,  $\frac{1}{\text{К}}$ ;  $\nu$  – 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  $t_{\text{в}}$  вдали от поверхности теплообмена, а в качестве определяющего размера – наружный диаметр трубы  $d_{\text{н}}$ .

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

При этой температуре для воздуха:

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

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

Вычисляем значение комплекса:

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

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

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

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

t, °C	(сθ) <sub>CO<sub>2</sub></sub>	(сθ) <sub>N<sub>2</sub></sub>	(сθ) <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	(сθ) <sub>в</sub>	(сθ) <sub>зл</sub>
	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:

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

#### 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

$$V_{\text{д}} = \alpha_{\text{в}} V^0 = 1,2 \cdot 5,2 = 6,2 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

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

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

Высшая теплота сгорания

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

Теоретические объемы продуктов полного сгорания твердых топлив при  $\alpha_{\text{в}}=1$  определяются по формулам:

-объем трехатомных газов

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

-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

$$V_{\text{сг}}^0 = V_{\text{RO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 = 0,96 + 4,12 = 5,08 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

-объем водяных паров

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}}^0 &= 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,0161V^0 = \\ &= 0,111 \cdot 3,8 + 0,0124 \cdot 13,2 + 0,0161 \cdot 5,2 = 0,67 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Полный объем газообразных продуктов сгорания 1 кг топлива при  $\alpha_{\text{в}} = 1$

$$V_{\Gamma}^0 = V_{\text{сг}}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 5,08 + 0,67 = 5,75 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Объем продуктов сгорания при  $\alpha_{\text{в}} = 1,2$  определяется по формулам:

-объем сухих газов

$$V_{\text{сг}} = V_{\text{сг}}^0 + (\alpha_{\text{в}} - 1)V^0 = 5,08 + (1,2 - 1) \cdot 5,2 = 6,12 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

-объем водяных паров

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha_{\text{в}} - 1) \cdot V^0 = 0,67 + 0,0161(1,2 - 1) \cdot 5,2 = \\ &= 0,69 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Полный объем продуктов сгорания

$$V_{\Gamma} = V_{\text{сг}} + V_{\text{H}_2\text{O}} = 6,12 + 0,69 = 6,81 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Энтальпия продуктов сгорания,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , при  $\alpha_{\text{в}} = 1$  и температуре газов  $\vartheta = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  находится по формуле

$$H_{\Gamma}^0 = V_{\text{CO}_2} (c\vartheta)_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 (c\vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 (c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (3.1)$$

где  $(c\vartheta)_{\text{CO}_2}$ ,  $(c\vartheta)_{\text{N}_2}$ ,  $(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$  – энтальпия соответственно  $1\text{м}^3$  углекислого газа, азота и водяных паров (находится по табл. 3.2 при  $\vartheta = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ):

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

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

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

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,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ,

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

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

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

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

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

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

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

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

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



#### 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

$$N_1 = \frac{N_e}{i V_h} = \frac{100}{4 \cdot 1,13 \cdot 10^{-3}} = 22124 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}.$$

Удельный индикаторный расход топлива

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

$$\text{Ответ: } N_1 = 22124 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}; \quad g_i = 0,239 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

### 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  $\eta_{\text{е.ад}} = 0,75$ .

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:**

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

#### Решение

Определяем степень повышения давления

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

Объёмный КПД компрессора

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

Коэффициент подачи компрессора

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

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

$$N_{ад} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1 \cdot V}{10^3} \left( \lambda^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,118}{10^3} \left( 7,5^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) = \\ = 3,21 \text{ кВт}.$$

Эффективная мощность привода компрессора

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

Необходимая мощность электродвигателя с 10 %-ным запасом перегрузки

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

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

## Задача №6

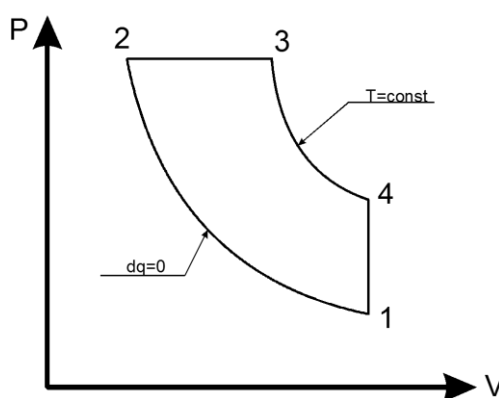
**Общее условие.** Определить параметры  $P$  (давление, Бар),  $V$  (объём, м<sup>3</sup>/кг),  $T$  (температура, К),  $t$  (температура, °С) во всех характерных точках заданного цикла, во всех процессах цикла определить приведенные к 1кг параметры  $q$ , (теплоту кДж/кг);  $\Delta U$ , (изменение внутренней энергии кДж/кг);  $\Delta h$ , кДж/кг;  $l$ , (работу кДж/кг);  $\Delta S$  (изменение энтропии), кДж/кг·град. Построить графики цикла в  $P$ - $V$  координатах и в  $T$ - $S$  координатах. Определить параметры цикла термич. КПД ( $\eta_t$ ), работу  $l_{ц}$  (кДж/кг), среднее давление  $P_{ср}$ .

В качестве рабочего тела принять воздух, массой 1 кг ;

считать теплоёмкость воздуха постоянной  $C_p=1,005$  кДж/кг·град

$C_v=0,718$ кДж/кг·град

### Пример выполнения задачи №6



**Дано:**  $V_1=1,1$  м<sup>3</sup>/кг ;  $t_1=80$  °С ;  $E=V_1/V_2=14$  ;  $q_{2-3}=840$  кДж/кг.

#### Часть 1.

Процесс 1-2: адиабатный  $P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$

Процесс 2-3: изобарный  $V_2/V_3 = T_2/T_3$

Процесс 3-4: изотермический  $V_3/V_4 = P_4/P_3$

Процесс 4-1: изохорный  $P_4/P_1 = T_4/T_1$

$K=C_p/C_v=1,4$   $V_1=V_4$ ;  $P_2=P_3$ ;  $T_3=T_4$ .

$R=287,2$

Уравнение Менделеева-Клапейрона:

$P_1 V_1 = RT_1 \rightarrow P_1 = RT_1/V_1 = 287,2 \cdot 353/1,1 \cdot 10^5 = 0,92$  бар;

$V_1/V_2=14 \rightarrow V_2=V_1/14=1,1/14=0,0785$  м<sup>3</sup>/кг;

$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k \rightarrow P_2 = P_1 V_1^k / V_2^k = P_1 (V_1/V_2)^k = 0,92(1,1/0,0785)^{1,4} = 37,061$  бар

$P_2 V_2 = RT_2 \rightarrow T_2 = P_2 V_2 / R = 37,061 \cdot 0,0785 \cdot 10^5 / 287,2 = 1012,98$  К

$$q_{2-3}=C_p(T_3-T_2) \rightarrow q_{2-3}=C_pT_3-C_pT_2 \rightarrow C_pT_3=q_{2-3}+C_pT_2 \rightarrow T_3=(q_{2-3}+C_pT_2)/C_p=$$

$$=(840+1,005 \cdot 1012,98)/1,005=1848,8 \text{ К}$$

$$P_3V_3=RT_3 \rightarrow V_3=RT_3/P_3=287,2 \cdot 1848,8/37,061 \cdot 10^5=0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$P_4V_4=RT_4 \rightarrow P_4=RT_4/V_4=287,2 \cdot 1848,8/1,1 \cdot 10^5=4,83 \text{ бар}$$

Таблица 1.

№ точки	P, бар	V, м <sup>3</sup> /кг	T, К	t, °С
1	0,92	1,1	353	80
2	37,061	0,0785	1012,98	739,98
3	37,061	0,14	1848,8	1575,8
4	4,83	1,1	1848,8	1575,8

## ЧАСТЬ 2

Процесс 1-2:

$$\Delta U=C_v \cdot (T_2-T_1)=0,718 (1012,98 - 353)=473,86 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta h = C_p \cdot (T_2-T_1)=1,005 \cdot (1012,98-353)=663,28 \text{ кДж/кг}$$

$$l = (R \cdot T_1/\kappa - 1) \cdot (1 - T_2/T_1) = (287,2 \cdot 353/1,4 - 1) \cdot (1 - 1012,98/353) = -473,86 \text{ кДж/кг}$$

процесс 2-3:

$$q = C_p \cdot (T_3-T_2)=1,005 \cdot (1848,8-1012,98)=840 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta U=C_v \cdot (T_3-T_2)=0,718 \cdot (1848,8-1012,98)=600,12 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta h=840 \text{ кДж/кг}$$

$$l = p \cdot (V_3-V_2)=37,061 \cdot 10^5 \cdot (0,14-0,0785)=228,06 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta S=C_p \cdot \ln T_3/T_2=1,005 \cdot \ln 1848,8/1012,98=0,61 \text{ кДж/ кг} \cdot \text{гр}$$

Процесс 3-4:

$$q=p_3 \cdot V_3 \cdot \ln V_4/V_3=1069,62 \text{ кДж/кг}$$

$$l=q$$

$$\Delta S=q/T=1069,62/1848,8=0,58 \text{ кДж/ кг} \cdot \text{гр}$$

Процесс 4-1:

$$q = C_v \cdot (T_1-T_4)=-1073,98 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta U = q$$

$$\Delta h = C_p \cdot (T_1 - T_4) = -1503,31 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta S = C_v \cdot \ln T_1 / T_4 = -1,19 \text{ кДж/кг} \cdot \text{гр}$$

Таблица 2

процесс	q, кДж/кг	$\Delta U$ , кДж/кг	$\Delta h$ , кДж/кг	l, кДж/кг	$\Delta S$ , кДж/кг·гр
1-2	0	473,86	663,28	-473,8	0
2-3	840	600,12	840	228,06	0,61
3-4	1069,62	0	0	1069,62	0,58
4-1	-1073,98	-1073,98	-1503,31	0	-1,19

### ЧАСТЬ 3

Построение графика цикла в P-V координатах. Расчет промежуточных точек для построения графика цикла.

Процесс 1-2:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

$$P_1 V_1^k = P_x V_x^k$$

$$P_x = P_1 \cdot V_1^k / V_x^k$$

$$P_x = 1,051 / V_x^k$$

при  $V_x = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$   $P_x = 2,77 \text{ бар}$

при  $V_x = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$   $P_x = 26,41 \text{ бар}$

при  $V_x = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$   $P_x = 10 \text{ бар}$

процесс 3-4:

$$P_3 V_3^k = P_4 V_4^k$$

$$P_3 V_3^k = P_x V_x^k$$

$$P_x = P_3 \cdot V_3^k / V_x^k$$

$$P_x = 2,36 / V_x^k$$

при  $V_x = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$   $P_x = 6,22 \text{ бар}$

при  $V_x = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг}$   $P_x = 2,06 \text{ бар}$

при  $V_x = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$   $P_x = 22,52 \text{ бар}$

Производится построение графика в  $p$ - $V$  координатах по расчетным данным в выбранном масштабе координатных осей

#### ЧАСТЬ 4

Построение графика цикла в  $T$ - $S$  координатах. Расчет промежуточных точек для построения графика цикла.

Процесс 2-3:

$$\Delta S_x = C_p \cdot \ln T_x / T_3$$

$$\text{при } T_x = 1200 \text{ К} \quad \Delta S_x = 0,17 \text{ кДж/кг} \cdot \text{гр}$$

$$\text{при } T_x = 1400 \text{ К} \quad \Delta S_x = 0,32 \text{ кДж/кг} \cdot \text{гр}$$

$$\text{при } T_x = 1600 \text{ К} \quad \Delta S_x = 0,45 \text{ кДж/кг} \cdot \text{гр}$$

Процесс 4-1:

$$\Delta S_x = C_v \cdot \ln T_x / T_4$$

$$\text{при } T_x = 1800 \text{ К} \quad \Delta S_x = 1,17 \text{ кДж/кг} \cdot \text{гр}$$

$$\text{при } T_x = 400 \text{ К} \quad \Delta S_x = 0,51 \text{ кДж/кг} \cdot \text{гр}$$

Производится построение графика в  $T$ - $S$  координатах по расчетным данным в выбранном масштабе координатных осей. Предварительно проводится расчет  $S_1$  для нормальных физических условий. Пример для воздушной смеси:

$$S_1 = c_p \ln(T_1/T_0) - R \ln(p_1/p_0)$$

где  $T_0$  и  $p_0$  - нормальная температура и давление,

для воздушной смеси 273К и  $1.013 \cdot 10^5$  Па

#### ЧАСТЬ 5

Определить параметры цикла:

1. термический КПД ( $\eta_t$ )

$$\eta_t = I_{ц} / q_1 = 1 - q_2 / (q_1 + q_3) = 1 - C_p(T_4 - T_1) / C_p(T_3 - T_2) + p_3 \cdot V_3 \cdot \ln V_4 / V_3 = 0,608 = 60,8\%$$

2. работа за цикл  $I_{ц}$  (кДж/кг)

$$I_{ц} = q_1 + q_3 - q_2 = C_p(T_3 - T_2) + p_3 \cdot V_3 \cdot \ln V_4 / V_3 - C_p(T_4 - T_1) = C_p(T_3 - T_2 - T_4 + T_1) = 835,64$$

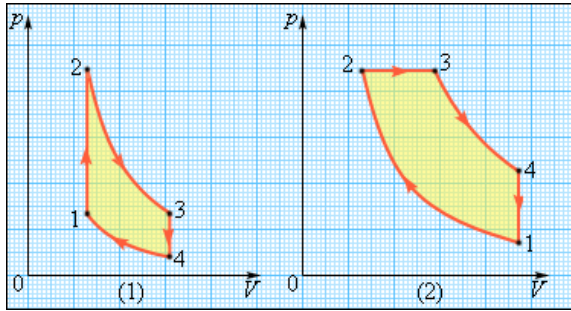
3. Среднее индикаторное давление  $P_t$

$$P_t = I_{ц} / (V_{\max} - V_{\min}) = 663,28 / (1,1 - 0,0785) = 649,32 \text{ кДж} \cdot \text{кг} / \text{кг} \cdot \text{м}^3 = 649,32 \text{ кДж} / \text{м}^3 =$$

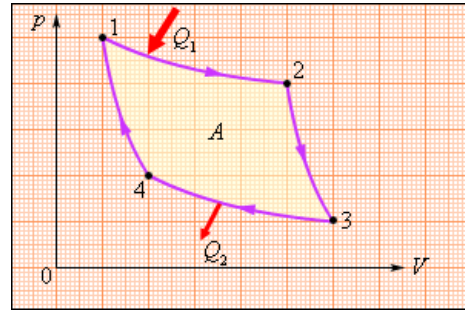
$$0,64932 \text{ Дж} / \text{м}^3 = 0,64932 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 \cdot \text{м}^3 = 0,64932 \text{ кг} / \text{с}^2 \cdot \text{м} = 0,64932 \text{ Па} = 6,5 \text{ Бар}$$



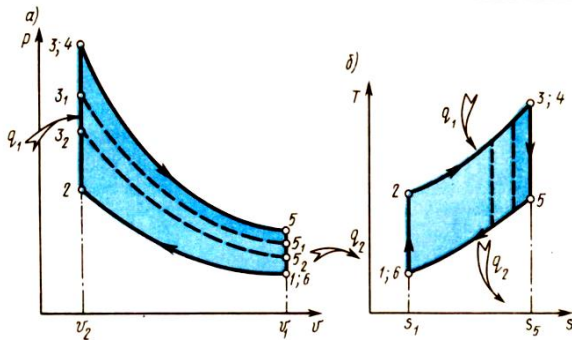
## Виды циклов работы двигателей



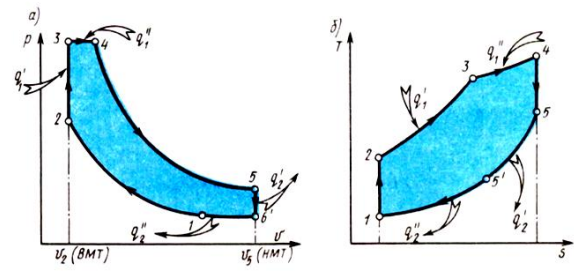
Циклы работы тепловых машин:  
1-при изохорном подводе теплоты;  
2-при изобарном подводе теплоты.



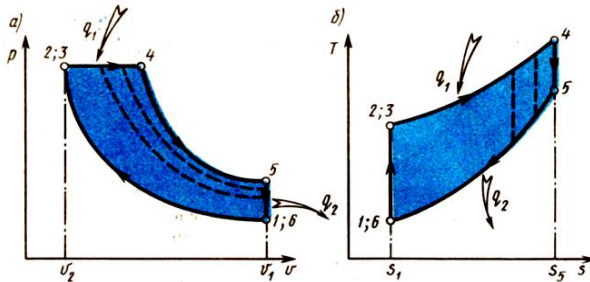
Цикл Карно для идеальной тепловой машины



Цикл Отто (при  $V = \text{const}$ )



Цикл Сабатэ-Тринклера



Цикл Дизеля (при  $p = \text{const}$ )

### Варианты для расчета циклов двигателей (Задача №6).

*(Брать из условия задач только исходные данные и решать в соответствии с общим условием приведенным к задаче №6 и примером, только для своего цикла и своих исходных данных)*

1. Для идеального цикла ДВС со смешанным подводом теплоты определить параметры рабочего тела (воздух) в характерных точках, степень повышения давления  $\lambda$ , степень предварительного расширения  $\rho$ , количество подведенной и отведенной теплоты, работу и термический КПД цикла, если начальные параметры рабочего тела  $p_1 = 0,12$  МПа,  $t_1 = 37$  °С, степень сжатия  $\epsilon = 12$ , максимальная температура цикла  $t_4 = 1700$  °С, температура после адиабатного расширения  $t_5 = 600$  °С.

2. Для бескомпрессорного дизеля, работающего по циклу Тринклера с изохорно – изобарным подводом теплоты определить основные параметры состояния  $p$ ,  $v$ ,  $t$  характерных точек цикла, полезную работу и термический КПД двигателя по заданным

значениям начального давления  $p_1 = 96$  кПа и температуре  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ , степени сжатия  $\varepsilon = 18$  ( $v_1/v_2$ ), степени повышения давления  $\lambda = 1,5$  ( $p_3/p_2$ ) и степени предварительного расширения  $\rho = 1,5$  ( $v_3/v_2$ ). Рабочим телом считать воздух, полагая теплоемкость его постоянной. Изобразить цикл двигателя внутреннего сгорания в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах.

3. Рассчитать цикл ДВС с изохорным подводом теплоты (цикл Отто), если начальные параметры рабочего тела  $p_1 = 0,1$  МПа,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 6,5$ , а отведенное количество теплоты  $q_2 = 320$  кДж/кг. Определить параметры в характерных точках цикла, подведенное количество теплоты, работу и термический к.п.д. цикла, а также термический к.п.д. цикла Карно в том же интервале температур. Изобразить цикл в координатах  $p$ ,  $v$  и  $T$ ,  $s$ . Рабочее тело - воздух.

4. Тепловой двигатель по циклу ДВС с подводом тепла при постоянном объеме. При этом параметры рабочего тела последовательно изменяются в четырех процессах: 1-2 – адиабатное сжатия; 2-3 – изохорный подвод тепла; 3-4 – адиабатное расширения; 4-1 – изохорное охлаждения. Рабочее тело – воздух. Начальные параметры рабочего тела соответствуют нормальным техническим условиям. Степень сжатия  $\varepsilon = 5$ , количество тепла подведенное к рабочему телу  $q = 950$  кДж/кг. Принимая за рабочее тело газ неизменного состава, рассчитать параметры рабочего тела в контрольных точках процесса; КПД двигателя; соотношения работы расширения и работы сжатия. Изобразить цикл в диаграммах  $Pv$  и  $Ts$ .

5. Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  определить параметры характерных для цикла точек, количества подведенной и отведенной теплоты, термический КПД цикла и его полезную работу (кДж).

Дано:  $P_1 = 0,15$  МПа;  $t_1 = 120^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon = 7$ ;  $\lambda = 1,2$ ;  $k = 1,4$ .

Рабочее тело - воздух. Теплоемкость считать постоянной. Построить цикл в координатах  $P$ - $v$ .

6. Построить  $p, v$  – и  $T, s$  – диаграммы цикла двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме. С помощью диаграмм рассчитать цикл ДВС по данным: давление  $p_1 = 0,2$  МПа; начальная температура  $t_1 = 28^\circ\text{C}$ ; степень сжатия  $\varepsilon = 5$ ; степень повышения давления  $\lambda = 1,2$ ; газовая постоянная  $R = 188,9$  кДж/кг  $\times$  К; коэффициент адиабаты  $k = 1,29$ ; теплоемкость газа считать постоянной, количество газа 1 кг.

7. Воздух, начальные параметры которого  $p_1 = 0,17$  МПа и  $T_1 = 300$  К, адиабатно сжимается в цилиндре ДВС. Степень сжатия  $\varepsilon = 10$ . Затем в изохорном процессе к нему подводится 288 кДж/кг теплоты. Определить работу сжатия и параметры воздуха после подвода теплоты.

8. Определить для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты параметры ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ) в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла, если начальное давление  $p_1 = 0,12$  МПа, начальная температура  $t_1 = 250^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 18$ , степень повышения давления 1,5, степень предварительного расширения 1,6 и показатель адиабаты  $k = 1,4$ . рабочее тело обладает свойствами воздуха. Изобразить цикл в  $pV$ -диаграмме.

9. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  начальное давление  $p_1 = 0,12$  МПа, начальная температура  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ , степень

сжатия  $\varepsilon = 12$ , степень предварительного расширения  $2,0$  и показатель адиабаты  $k=1,4$ . Определить параметры ( $p, V, T$ ) и характерные для цикла точки, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла.

10. Определить параметры ( $p, V, T$ ) в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла, приведённое на графике тепловой машины. Процессы 1–2 и 3–4 — изохорические. В процессах 2–3 и 3–4 давление прямо пропорционально объёму. Рабочее тело — одноатомный идеальный газ. Известно, что  $p_2/p_1 = V_4/V_2 = 6$ ,  $p_1 = 0,1$  МПа, начальная температура  $t_1 = 80^\circ\text{C}$ .

11. В термодинамическом цикле Дизеля степень сжатия равна  $15$ , а степень предварительного расширения  $1,5$ . Начальное давление  $p_1 = 0,16$  МПа, начальная температура  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Определить термические КПД циклов при использовании в качестве рабочего тела углекислого газа и гелия. Молярные изобарные теплоёмкости гелия и углекислого газа  $\mu_{p_{\text{He}}} = 20,8$  кДж/(кг·К) и  $\mu_{p_{\text{CO}_2}} = 33,28$  кДж/(кг·К).

12. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  определить количество подведенной теплоты  $q_1$ , полезную работу  $l$  и термический к.п.д. цикла  $\eta_t$ , если количество отведенной теплоты  $q_2 = 500$  кДж/кг, степень сжатия  $\varepsilon = 8$  и показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Изобразить цикл в  $p$ - $v$ -диаграмме.

13. Определить для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты параметры ( $p, v, T$ ) в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла, если начальное давление  $p_1 = 0,12$  МПа, начальная температура  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 18$ , степень повышения давления  $\lambda = 1,5$ , степень предварительного расширения  $\rho = 1,6$  и показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Изобразить цикл в  $p$ - $v$ -диаграмме.

14. В цикле идеального поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  начальное давление  $p_1 = 0,12$  МПа, начальная температура  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 12$ , степень предварительного расширения  $\rho = 2,0$  и показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Определить параметры ( $p, v, T$ ) в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла. Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Изобразить цикл в  $p$ - $v$ -диаграмме.

15. Для цикла Отто с подводом теплоты при  $V = \text{const}$  определить параметры рабочего тела в характерных точках цикла, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу, если начальные параметры  $p_1 = 1,04$  бар,  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ , а параметры точки 3  $p_3 = 226,95$  бар,  $t_3 = 3905,1^\circ\text{C}$ . Построить цикл в диаграммах  $p - V$  и  $T - S$ . Рабочее тело имеет свойства воздуха.

16. В цикле Дизеля при степени предварительного расширения  $\rho = 1,2$ , термический КПД равен  $0,5$ . Начальное давление  $p_1 = 0,12$  МПа, начальная температура  $t_1 = 250^\circ\text{C}$ . Теплоёмкость рабочего тела  $c_v = 0,718$  кДж/(кг·К), газовая постоянная  $R = 287$  Дж/(кг·К). Определить параметры цикла, работу  $l_{\text{ц}}$  (кДж/кг), среднее давление  $P_t$ .

17. Для цикла двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $V = \text{const}$  определить параметры рабочего тела в характерных точках цикла, термический КПД, отведенной теплоты, полезную работу, если начальные параметры  $p_1$

$= 1,04 \text{ бар}$ ,  $t_1 = 25^\circ \text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 14$  и количество подведенной теплоты  $2,7141 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ . Построить цикл в диаграммах  $p - V$  и  $T - S$ . Рабочее тело имеет свойства воздуха.

18. Тепловая машина работает по циклу Карно, состоящему из двух изотерм 1–2 и 3–4 и двух адиабат 2–3 и 4–1. Работа сжатия в изотермическом процессе 3–4 равна  $A_{34} = 120 \text{ кДж}$  ( $A_{34} > 0$ ), а работа сжатия в адиабатическом процессе 4–1 равна  $A_{41} = 250 \text{ кДж}$  ( $A_{41} > 0$ ). Какую работу совершает машина за весь цикл 1–2–3–4–1? Рабочее вещество — 10 молей идеального одноатомного газа. Изотермическое сжатие происходило при температуре  $T = 363 \text{ К}$ .

19. В цикле Карно при температуре  $1800^\circ \text{C}$  к 1 кг воздуха подводится  $400 \text{ кДж}$  теплоты. Термический КПД данного цикла равен  $0,60$ . Начальное давление  $p_1 = 0,15 \text{ МПа}$ . Определить количество теплоты  $q_2$ , отводимой в холодный источник, и температуру  $T_2$  охладителя. Рабочее тело воздух. Определить параметры цикла, работу  $l_{\text{ц}}$  (кДж/кг), среднее давление  $P_{\text{т}}$ .

20. Для цикла Отто с подводом теплоты при  $V = \text{const}$  определить параметры рабочего тела в характерных точках цикла, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу, если начальные параметры  $p_1 = 1,24 \text{ бар}$ ,  $t_1 = 35^\circ \text{C}$ , а параметры точки 3  $p_3 = 286,25 \text{ бар}$ ,  $t_3 = 3815^\circ \text{C}$ . Построить цикл в диаграммах  $p - V$  и  $T - S$ . Рабочее тело имеет свойства воздуха.

21. Определить параметры и показатели цикла Тринклера при начальных параметрах  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 15^\circ \text{C}$ . Рабочее тело – воздух. К рабочему телу подводится теплота  $q_1 = 1500 \text{ КДж/кг}$ . Доля теплоты подводимой в изохорном процессе  $0,7$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 17$ . Термический к.п.д. цикла равен  $0,675$ . Построить цикл в диаграммах  $p - V$  и  $T - S$ .

22. Определить параметры и показатели цикла Отто при начальных параметрах  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 15^\circ \text{C}$ . Рабочее тело – воздух. К рабочему телу подводится теплота  $q_1 = 1500 \text{ КДж/кг}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 12$ . Построить цикл в диаграммах  $p - V$  и  $T - S$ .

23. В цикле Отто рабочему телу сообщается энергия в форме теплоты  $250 \text{ кДж/кг}$ . Температура начала процесса сжатия  $t_1 = 27^\circ \text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 10$ . Рабочее тело – воздух. Молярная массовая теплоемкость воздуха  $\mu_{\text{ср}} = 35,3 \text{ кДж/(кмоль К)}$ , а молярная масса  $28,97 \text{ кг/моль}$ . Определить параметры и показатели цикла. Построить цикл в диаграммах  $p - V$  и  $T - S$ .

24. В цикле Тринклера степень повышения давления  $\lambda = 1,8$ , степень предварительного расширения  $\rho = 1,3$ . Рабочее тело – воздух, начальные параметры которого  $p_1 = 0,17 \text{ МПа}$  и  $T_1 = 300 \text{ К}$ , показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Определить параметры ( $p, v, T$ ) в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла. Построить цикл в диаграммах  $p - V$  и  $T - S$ .

25. В цикле Дизеля температура в начале сжатия  $t_1 = 27^\circ \text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 16$ . Рабочее тело воздух с молярной теплоемкостью  $\mu_{\text{ср}} = 35,3 \text{ кДж/(кмоль К)}$  и молярной массой  $28,97 \text{ кг/моль}$ , показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Объем рабочего тела в процессе подвода теплоты увеличивается в 2 раза. Максимальная температура цикла  $1819 \text{ К}$ . Определить параметры ( $p, v, T$ ) в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла. Построить цикл в диаграммах  $p - V$  и  $T - S$ .