

---

---

РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ

*ИНЖЕНЕРНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ*

Кафедра комбинированных ДВС.

ПАТРАХАЛЫЦЕВ Н. Н.

**Теория комбинированных  
двигателей внутреннего сгорания**

Сборник задач и решений.

Издательство Российского университета дружбы народов.  
Москва, 2006.

=====

У Т В Е Р Ж Д Е Н О  
РИС Учёного совета  
Российского университета  
дружбы народов.

**Р е ц е н з е н т ы:**

кандидат технических наук, профессор И. К. Шаталов,  
кандидат технических наук Е. Г. Пономарёв.

**Патрахальцев Н. Н.**

Теория комбинированных двигателей внутреннего сгорания: Сборник задач и решений. - М.: Изд-во РУДН, 2006.-49 с., ил.

В задачнике содержится материал, изучаемый студентами первого курса магистратуры направления “Энергомашиностроение” специализации «Двигатели внутреннего сгорания, поршневые и комбинированные» во время выполнения практических и лабораторных работ. Задачи снабжены ориентировочными ответами, а первое изложение материала каждого раздела сопровождается задачей и примером её решения.

Материалы пособия могут быть полезны при изучении курсов “Теория рабочих процессов ДВС”, “Теория комбинированных ДВС”, “Установки с ДВС”, “Конструирование ДВС”, “Эксплуатация установок с ДВС”.

Подготовлено на кафедре комбинированных ДВС (двигателей внутреннего сгорания) Российского университета дружбы народов.

.....

©Издательство Российского университета дружбы народов, 2006 г.

©Н. Н. Патрахальцев , 2006 г.

---

---

## Введение.

Настоящий сборник задач предназначен для студентов магистратуры, изучающих курс теории комбинированных двигателей внутреннего сгорания, а также в целом для студентов, изучающих вопросы наддува ДВС. Сборник содержит около 50 задач по разным разделам указанного курса, причём, в качестве примера каждый раздел начинается задачей с выполненным решением. Задачи являются основой для выполнения близких по смыслу и содержанию задач, которые студенты решают на практических занятиях, при рубежном контроле, а также на экзаменах. Принципиально, задачи могут выполняться студентами при самостоятельных, домашних работах. При необходимости, соответствующие консультации проводятся преподавателем на практических занятиях в аудитории, в соответствии с установленным расписанием.

Студент должен решать задачи в специальной тетради для выполнения практических работ. Проверенные решения подписываются преподавателем.

Положительной оценки заслуживает использование материалов задач и решений при выполнении курсовой работы по дисциплине «Теория комбинированных ДВС».

## 1. Основные положения.

Развиваемая двигателем мощность ( $P_e$ , кВт) зависит от размеров цилиндра ( $V_h$ -рабочий объём цилиндра в литрах, л), от числа цилиндров ( $i$ ), от тактности двигателя ( $\tau=2$  или 4 для двухтактного или четырёхтактного двигателя соответственно), от применяемого топлива ( $H_u$ , кДж/кг и  $l_0$ , кг/кг), от качества рабочего процесса ( $\eta_i/\alpha$ ), коэффициента наполнения ( $\eta_v$ ), механического КПД ( $\eta_m$ ), частоты вращения ( $n$ , мин<sup>-1</sup>) и плотности наддувочного воздуха ( $\rho_k$ , кг/м<sup>3</sup>).

$$P_e = K \cdot \frac{V_h \cdot i \cdot H_u}{\tau \cdot l_0} \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \eta_v \cdot \eta_m \cdot \rho_k \cdot n,$$

где  $K$  – константа,  $K=10^{-3}$ .

Уравнение показывает, что основным методом форсирования двигателя по мощности является применение наддува, т. е. увеличение плотности воздуха, поступающего на зарядку цилиндра. Конечно, с применением наддува меняются и другие параметры, характеризующие рабочий процесс, что нужно оценивать при соответствующих прикидочных расчётах.

### Задача 1.1.

Определить мощность 4<sup>x</sup> цилиндрического дизеля ( $i=4$ ), если его модернизировали турбонаддувом. При этом известно, что  $V_h \cdot i = 14,9$  [л];  $H_u = 42500$  [кДж/кг];  $l_0 = 14,3$  [кг/кг];  $\eta_i = 42\%$ ;  $\alpha = 1,6$ ;  $\eta_v = 0,94$ ;  $\rho_k = 1,35$  [кг/м<sup>3</sup>];  $\eta_m = 0,88$ ;  $n = 2100$  мин<sup>-1</sup>.

Решение.

$$P_e = 10^{-3} [(V_h \cdot i)/(30\tau)](H_u/l_0)(\eta_i/\alpha)\eta_v \rho_k \eta_m \cdot n = \\ = 10^{-3} [14,9/(30 \cdot 4)](42500/14,3)(0,42/1,6)0,94 \cdot 1,35 \cdot 0,88 \cdot 2100 =$$

=====

= 227,2 кВт.

Задача 1.2.

Определить снижение мощности указанного выше дизеля, если он работает без наддува.

(Ответ: 26 кВт).

Задача 1.3.

Определить, сколько цилиндров необходимо иметь двигателю без наддува, чтобы достигнуть мощности  $P_e=280$  кВт, которую развивает двигатель с наддувом по задаче 1.1.

(Ответ: 5 цилиндров).

Задача 1.4.

Определить возможное повышение мощности дизеля по условиям задачи 1.1, если достигнутый уровень наддува составляет  $3\rho_0$ .

(Ответ: 605,8 кВт).

Задача 1.5.

Определить, какие размеры цилиндра ( $D/S=1$ ) должен иметь двигатель с мощностью, полученной в задаче 1,4, если он имеет естественное всасывание (без наддува).

(Ответ:  $D/S=11,5\text{см}/11,5\text{см}$ ).

Задача 1.6.

Определить мощность дизеля ( $i=4$ ), если его модернизировали турбонаддувом. При этом известно, что  $V_h \cdot i = 16,4$  [л];  $H_u = 42350$  [кДж/кг];  $l_0 = 14,3$  [кг/кг];  $\eta_i = 44$  %;  $\alpha = 1,46$ ;  $\eta_v = 0,90$ ;  $\rho_k = 1,55$  [кг/м<sup>3</sup>];  $\eta_m = 0,89$ ;  $n = 2400$  об/мин.

(Ответ:  $P_e=364$  кВт).

## Задача 1.7.

Определить мощность дизеля ( $i=6$ ), если его модернизировали турбонаддувом. При этом известно, что  $V_h \cdot i = 24$  [л];  $H_u = 42500$  [кДж/кг];  $l_0=14,5$  [кг/кг];  $\eta_i= 45$  %;  $\alpha = 1,7$ ;  $\eta_v = 0,93$ ;  $\rho_k = 1,8$  [кг/м<sup>3</sup>];  $\eta_m= 0,88$ ;  $n=2600$  об/мин.

(Ответ:  $P_e=594$  кВт).

## Задача 1.8.

Определить мощность дизеля ( $i=8$ ), модернизированного турбонаддувом. При этом известно, что  $V_h \cdot i = 26,6$  [л];  $H_u = 42500$  [кДж/кг];  $l_0=14,4$  [кг/кг];  $\eta_i= 41$  %;  $\alpha = 1,41$ ;  $\eta_v = 0,90$ ;  $\rho_k = 1,83$  [кг/м<sup>3</sup>];  $\eta_m= 0,86$ ;  $n=2450$  об/мин.

(Ответ:  $P_e=660$  кВт).

## Задача 1.9.

Определить снижение мощности указанного выше дизеля, если он работает без наддува.

## Задача 1.10.

Определить мощность бензинового двигателя с принудительным зажиганием ( $i=4$ ), если его модернизировали турбонаддувом. При этом известно, что  $V_h \cdot i = 1,6$  [л];  $H_u = 45000$  [кДж/кг];  $l_0 = 15$  [кг/кг];  $\eta_i= 40$  %;  $\alpha = 1,03$ ;  $\eta_v = 0,90$ ;  $\rho_k = 1,25$  [кг/м<sup>3</sup>];  $\eta_m= 0,89$ ;  $n = 6400$  об/мин.

## Задача 1.11.

Определить увеличение крутящего момента дизеля ( $i=6$ ), если его модернизировали турбонаддувом. При этом известно, что  $V_h \cdot i = 2,2$  [л];  $H_u = 42560$  [кДж/кг];  $l_0=14,4$  [кг/кг]; у двигателя с наддувом  $\eta_i= 44$  %;  $\alpha = 1,5$ ;  $\eta_v = 0,89$ ;  $\rho_k = 2,2$  [кг/м<sup>3</sup>];  $\eta_m= 0,89$  при  $n=3600$  об/мин.

## 2. Термодинамические основы процесса наддува

### Задача 2.1.

Имеются два обратимых термодинамических цикла (рис. 2.1.), а именно: 1-цикл (пунктирная линия) с подводом теплоты при  $V=\text{Const}$  (a-c-z-b-a) и 2 – (сплошная линия) со смешанным подводом теплоты (a-c-z-z'-b-a). Известно, что  $T_a=57^\circ\text{C}$ ,  $T_{z1}=1,25*T_{z2}$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 11$ ;  $c_v=0,7165$  КДж/кг\*К;  $k = 1,4$ . Среднее давление термодинамического цикла с подводом теплоты при  $V=\text{Const}$   $p_{t1} = 8,41$  бар (0,852 МПа).

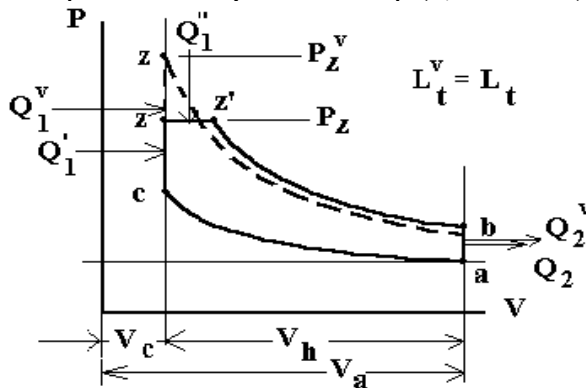


Рис. 2.1. Сравнение циклов с подводом тепла при  $V=\text{Const}$  и со смешанным подводом тепла при одинаковой степени сжатия и без ограничения уровня максимального давления  $P_z$  при условии совершения одинаковой работы.

Определить среднее давление  $p_{t2}$  цикла со смешанным подводом теплоты, если известно, что удельная подведённая теплота  $q_1=1234$  КДж/кг ( $q_1=Q_1/G$ ) одинакова для обоих циклов.

Решение.

Воспользуемся соотношениями для определения средних давлений термодинамических циклов. Поскольку известно, что  $p_t = \left( \frac{q_1}{v_h} \right) \cdot \eta_t$ ; то используя полученные из

уравнения Майера соотношения:  $\frac{c_p}{R} = \frac{k}{k-1}$ ;  $\frac{c_v}{R} = \frac{1}{k-1}$ ; а также уравнение состояния  $p \cdot v = R \cdot T$ ;

$$\text{получаем: } p_{t_1} = \frac{p_a}{k-1} \cdot \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon-1} \cdot [u_1 - 1] \cdot \eta_{t_2};$$

$$p_{t_2} = \frac{p_a}{k-1} \cdot \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon-1} \cdot [u_2 - 1 + k \cdot \lambda_2 \cdot \rho - 1] \cdot \eta_{t_2};$$

$$\text{Отсюда: } p_{t_2} = p_{t_1} \cdot \frac{[u_2 - 1 + k \cdot \lambda_2 \cdot \rho - 1] \cdot \eta_{t_2}}{[u_1 - 1] \cdot \eta_{t_1}};$$

Определим параметры, необходимые для решения полученного уравнения.

$$\eta_{t_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{11^{0,4}} = 0,6168;$$

$$\lambda_1 = \frac{T_{z1}}{T_c} = \frac{T_c + q_1 / c_v}{T_c} = 1 + \frac{q_1}{c_v \cdot T_c};$$

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{k-1} = (7 + 273) \cdot 11^{0,4} = 861,1 \text{ K};$$

$$\lambda_1 = 1 + \frac{1234}{0,7165 \times 861,1} = 3,0;$$

$$\lambda_2 = \frac{T_{z2}}{T_c} = \frac{T_{z1}}{1,25 \cdot T_c} = \frac{\lambda_1}{1,25} = \frac{3,0}{1,25} = 2,4; \quad \rho = \frac{T_{z2}}{T_{z'2}};$$

$$T_{z'2} = T_c \cdot \lambda_2 = 861,1 \cdot 2,4 = 2066,6 \text{ K}; \quad T_{z2} = T_{z'2} + \frac{q_{12}}{c_p};$$



$$q_{12}'' = q_1 - q_{12}' = q_1 - c_v \cdot (T_{z_2}' - T_c) =$$

$$1234 - 0,7165 \cdot (2066,6 - 861,6) =$$

$$= 370,2 \text{ КДж / кг};$$

$$T_{z_2} = 2066,6 + \frac{370,2}{1,0035} = 2435,5 \text{ К}; \text{ и}$$

$$\rho = \frac{2435,5}{2066,6} = 1,1785;$$

$$\eta_{t_2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \left( \frac{\rho^k \cdot \lambda_2 - 1}{\lambda_2 - 1 + k \cdot \lambda_2 \cdot (\rho - 1)} \right) =$$

$$= 1 - \frac{1}{11^{0,4}} \cdot \left( \frac{1,1785^{1,4} \cdot 2,4 - 1}{2,4 - 1 + 1,4 \cdot 2,4 \cdot (1,1785 - 1)} \right) = 0,6128$$

И тогда окончательно:

$$p_{t_2} = 8,41 \cdot \frac{2,4 - 1 + 1,4 \cdot 2,4 \cdot (1,1785 - 1) \cdot 0,6128}{(3 - 1) \cdot 0,6168} = 8,354 \text{ бар};$$

или (0,846 МПа).

### Задача 2.2.

Имеются два обратимых термодинамических цикла: 1-цикл с подводом теплоты при  $V = \text{Const}$  (a-c-z<sub>1</sub>-b<sub>1</sub>-a) и 2 – со смешанным подводом теплоты (a-c-z<sub>2</sub>-z<sub>2</sub>-b<sub>2</sub>-a). Известно, что  $T_a = 65^\circ\text{C}$ ,  $T_{z_1} = 1,25 \cdot T_{z_2}$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 13,5$ ;  $c_v = 0,726 \text{ КДж/кг} \cdot \text{К}$ ;  $k = 1,41$ . Среднее давление термодинамического цикла с подводом теплоты при  $V = \text{Const}$   $p_{11} = 9,4 \text{ бар}$ . Примем  $c_p$  для воздуха равным  $1,0035 \text{ КДж/кг} \cdot \text{К}$ .

Определить среднее давление  $p_{12}$  цикла со смешанным подводом теплоты, если известно, что удельная подведённая теплота  $q_1 = 1350 \text{ КДж/кг}$  ( $q_1 = Q_1/G$ ) одинакова для обоих циклов.

=====  
 Ответ:  $p_{t2} = 9,37$  бар.

Задача 2.3.

Имеем два цикла (начертите их): 1 – цикл двигателя с воспламенением от искры, т. е. с подводом теплоты при  $V = \text{Const}$ , ( $a_1 - c_1 - z_1 - b_1 - a_1$ ) и 2 – цикл тихоходного дизеля (т. е. с подводом теплоты при  $P = \text{Const}$ ) ( $a_2 - c_2 - z_2 - b_2 - a_2$ ), причём,  $P_{c2} = P_{z2} = P_{я1}$ . Известно, что  $V_a = 1400 \text{ см}^3$ ,  $V_{c2} = 100 \text{ см}^3$ .

Определить полезную работу цикла двигателя с воспламенением от искры ( $L_1$ ), если известно, что для обоих циклов  $n_1$  (показатель политропы сжатия) = 1,35, а  $n_2$  (показатель политропы расширения) = 1,25,  $P_a = P_{a1} = P_{a2} = 90 \text{ КПа}$ ,  $\lambda_1$  (т. е. первого цикла) = 3,5.

$$\text{Решение. } L_1 = \frac{P_{z1} \cdot V_{z1} - p_{b1} \cdot V_{b1}}{n_2 - 1} + \frac{P_{a1} \cdot V_{a1} - p_{c1} \cdot V_{c1}}{n_1 - 1};$$

$$\text{Иначе: } L_1 = \frac{P_{z1} \cdot V_{z1}}{n_2 - 1} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon_1^{n_2 - 1}} \right) + \frac{P_{a1} \cdot V_{a1}}{n_1 - 1} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon_1^{n_1 - 1}} \right);$$

Находим  $\varepsilon_1$ .

$$P_{c2}' = P_{a1} \cdot \varepsilon_2^{n_1} = P_{z1} = \lambda_1 \cdot P_{a1} = \lambda_1 \cdot P_{a1} \cdot \varepsilon_1^{n_1};$$

Отсюда

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_2}{\lambda_1^{1/n_1}} = \frac{14}{3,5^{1/1,35}} = 5,53; \text{ где } \varepsilon_2 = \frac{1400}{100} = 14;$$

$$\text{Тогда } V_{z1} = V_{c1} = \frac{V_{a1}}{\varepsilon_1} = \frac{1400}{5,53} = 253,2 \text{ см}^3;$$

$$P_{z2} = P_{a1} \cdot 14^{1,35} = 90 \cdot 35,26 = 3173 \text{ КПа};$$

Подставляя известные значения в выражение для работы цикла, получаем:

$$L_1 = \frac{3173 \cdot 10^3 \cdot 253,2 \cdot 10^{-6}}{0,25} \cdot \left( 1 - \frac{1}{5,53^{0,25}} \right) +$$

$$\frac{90 \cdot 10^3 \cdot 1400 \cdot 10^{-6}}{0,35} \cdot \left( 1 - \frac{1}{5,53^{0,35}} \right) = 1279 \text{ Н.м.}$$

Задача 2.4.

Циклы 1 и 2 с подводом теплоты соответственно при  $V=\text{Const}$  ( $a_1-c_1-z_1-b_1-a_1$ ) и с подводом теплоты при  $P=\text{Const}$  ( $a_2-c_2-z_2-b_2-a_2$ ) имеют показатели политроп сжатия и расширения  $n_1=1,34$  и  $n_2=1,25$ , давление начала сжатия  $P_a = P_{a1} = P_{a2} = 90$  КПа,  $\lambda_1=3,5$ . При этом известно, что  $V_a=1047 \text{ см}^3$ , а  $V_c=75,5 \text{ см}^3$ .

Определить полезную работу цикла с подводом теплоты при  $V=\text{Const}$ .

Ответ: 605,1 Н.м.

Задача.2..5.

Определить работу сжатия в термодинамическом цикле 4-х тактного дизеля, имеющего  $D/S=260/260$ ,  $\varepsilon=13$ ,  $n_1=1,36$ , (тепловозный дизель 10 ЧН 26/26,  $N_e=4400$  кВт,  $n=1100 \text{ мин}^{-1}$ , давление наддува  $p_k=0,33$  МПа). Давление начала сжатия в цилиндре  $p_a=0,318$  МПа=3,14 бар.

Решение.

Работа сжатия  $L_{ac}=(p_a \cdot V_a - p_c \cdot V_c)/(n_1-1)$ ;

$p_a=3,14$  бар,  $p_c=p_a \cdot \varepsilon^{n_1}=3,14 \cdot 13^{1,36}=102,78$  бар.

$V_a=V_h \cdot [\varepsilon/(\varepsilon-1)]$ ,  $V_c=V_h/(\varepsilon-1)$ ,

$V_h=\pi \cdot [D^2/4] \cdot S = \pi \cdot \{[(0,26)^2/4]\} \cdot 0,26 =$

$=0,0138 \text{ м}^3$ .  $V_a=0,0138 \cdot (13/12)=0,01495 \text{ м}^3$ .

$V_c=0,0138/12=1,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,

Следовательно

$$L_{ac} = \frac{(3,14 \cdot 10^5)(0,0495) - (102,78 \cdot 10^5)(1,15 \cdot 10^{-3})}{1,36 - 1} = -10342 \text{ Нм};$$

Задача 2.6.

Определить работу сжатия термодинамического цикла 4-х тактного двигателя ( $D/S=230/260$ ,  $\varepsilon=16$ ,  $n_1=1,36$ ), если известно, что давление начала сжатия  $p_a=0,95$  бар.

Ответ: -5208 Н.м.

Задача. 2.7.

Определить среднее индикаторное давление ( $p_i$ ) 4-х тактного высокооборотного дизеля, если известно, что он имеет  $D/S=13/14$  (см/см),  $i=6$ ,  $\varepsilon=16$ ,  $\rho=1,3$ ,  $\varphi_n=0,94$  (коэффициент полноты индикаторной диаграммы),  $p_a=0,9$  бар,  $p_c=39$  бар,  $p_z=90$  бар,  $p_b=3,9$  бар.

Решение.

$$p_i = p_a \cdot \frac{\varepsilon^{n_1}}{\varepsilon - 1} \cdot [\lambda \cdot \varphi - 1] \cdot \frac{\lambda \cdot \rho}{n_2 - 1} \cdot \left( -1 / \delta^{n_2 - 1} \right) \cdot \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left( -1 / \varepsilon^{n_1 - 1} \right) \cdot \varphi_n;$$

$$p_c = p_a \cdot \varepsilon^{n_1} = 39 \text{ бар}; \quad n_1 = [\ln(p_c/p_a)] / \ln \varepsilon = [\ln(39/0,9) / \ln 16] = 1,36;$$

$$\lambda = p_z/p_c = 90/39 = 2,3077; \quad \delta = \varepsilon/\rho = 16/1,3 = 12,3077;$$

$$n_2 = [\ln(p_z/p_b) / \ln \delta] = [\ln(90/3,9) / \ln(12,3077)] = 1,25;$$

После подстановки в уравнение известных значений получа-

ем:

$$p_i = \frac{39}{15} \cdot [(2,3077 \cdot 0,3) + \frac{2,3077 \cdot 1,3}{0,25} \cdot (1 - \frac{1}{12,3077^{0,25}})] - \frac{1}{0,36} \cdot (1 - \frac{1}{16^{0,36}})] \cdot 0,94 = 11,075 \text{ бар} = 1,122 \text{ МПа}.$$

Задача 2.8.

Четырёхтактный дизель с естественным всасыванием работает с коэффициентом остаточных газов  $\gamma_{r0}=0,04$ . Применением нагнетателя двигатель форсирован наддувом и имеет  $p_k=1,5$  бар и  $T_k=360$  К. Одновременно произошло увеличение давления и температуры газов на выпуске (от  $p_{r0}$  и  $T_{r0}$  до  $p_{rn}$  и  $T_{rn}$ ) соответственно на 15% и 22%. Новый коэффициент остаточных газов ( $\gamma_{rn}$ ) стал равен 0,025. Определить процент изменения коэффициента наполнения двигателя после применения наддува, если  $p_0=1$  бар,  $t_0=20$  °С.

Решение.

Для четырёхтактного двигателя имеем:

$$\gamma_r = \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_r}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_r} \cdot \frac{1}{\eta_v}; \text{ (предполагаем, что коэффициент}$$

продувки равен 1,0).

$$\text{Следовательно } \eta_v = \frac{1}{\gamma_r} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_r}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_r};$$

$$\text{Тогда } \frac{\eta_{v_n}}{\eta_{v_0}} = \frac{\gamma_{r_0}}{\gamma_{r_n}} \cdot \frac{p_{k_0}}{p_{k_n}} \cdot \frac{p_{r_n}}{p_{r_0}} \cdot \frac{T_{k_n}}{T_{k_0}} \cdot \frac{T_{r_0}}{T_{r_n}};$$

$$\text{Или } \frac{\eta_{v_n}}{\eta_{v_0}} = \frac{0,04}{0,025} \cdot \frac{1}{1,5} \cdot \frac{1,15 \cdot p_{r_0}}{p_{r_0}} \cdot \frac{360}{293} \cdot \frac{T_{r_0}}{1,22 \cdot T_{r_0}} = 1,2354.$$

$$\text{Или } \eta_{v_n} = 1,2354 \cdot \eta_{v_0};$$

Следовательно изменение коэффициента наполнения составило  $\Delta\eta_v = 23,54\%$ .

Задача 2.9.

Четырёхтактный дизель с естественным всасыванием работает с коэффициентом остаточных газов  $\gamma_{г0}=0,05$ . Применением нагнетателя двигатель форсирован наддувом и имеет  $p_k=1,65$  бар и  $T_k=395$  К. Одновременно произошло увеличение давления и температуры газов на выпуске (от  $p_{г0}$  и  $T_{г0}$  до  $p_{гн}$  и  $T_{гн}$ ) соответственно на 16% и 26%. Новый коэффициент остаточных газов ( $\gamma_{гн}$ ) стал равен 0,032. Определить процент изменения коэффициента наполнения двигателя после применения наддува, если  $p_0=1$  бар,  $t_0=20$  °С.

(Ответ: 11,1 %).

Задача 2.10.

Четырёхтактный дизель с естественным всасыванием работает с коэффициентом остаточных газов  $\gamma_{г0}=0,08$ . Применением нагнетателя двигатель форсирован наддувом и имеет  $p_k=1,55$  бар и  $T_k=380$  К. Одновременно произошло увеличение давления и температуры газов на выпуске (от  $p_{г0}$  и  $T_{г0}$  до  $p_{гн}$  и  $T_{гн}$ ) соответственно на 14% и 24%. Новый коэффициент остаточных газов ( $\gamma_{гн}$ ) стал равен 0,052. Определить процент изменения коэффициента наполнения двигателя после применения наддува, если  $p_0=1$  бар,  $t_0=10$  °С.

(Ответ: 11,3 %).

Задача 2.11.

Четырёхтактный дизель с естественным всасыванием работает с коэффициентом остаточных газов  $\gamma_{г0}=0,035$ . Применением нагнетателя двигатель форсирован наддувом и имеет  $p_k=1,95$  бар и  $T_k=445$  К. Одновременно произошло увеличе-

ние давления и температуры газов на выпуске (от  $p_{r0}$  и  $T_{r0}$  до  $p_{гн}$  и  $T_{гн}$ ) соответственно на 19% и 29%. Новый коэффициент остаточных газов ( $\gamma_{гн}$ ) стал равен 0,032. Определить процент изменения коэффициента наполнения двигателя после применения наддува, если  $p_0=1$  бар,  $t_0=5$  °С.

(Ответ: 1,9%).

### 3. Определение расхода воздуха двигателем и мощности компрессора

Размеры компрессора определяются по расходу воздуха и требуемой степени повышения давления ( $\pi_k=p_2/p_1$ ). На индикаторной диаграмме идеального четырёхтактного двигателя с механическим наддувом (рис. 3.1.) видно, что работа газообмена ( $L_{r0}$ ) (прямоугольник 0-1-2-а-0) положительна.

Т. е. индикаторная работа идеального двигателя равна

$$L_i = \oint p \cdot dV + (p_2 - p_1) \cdot V_h \text{ [Н·м] или [Дж]}$$

где  $L_{z0} = (p_2 - p_1) \cdot V_h$  [Дж]. Эту работу создаёт приводной компрессор, т. е.  $L_{z0} = L_{k_{ад}}$ . Адиабатная работа компрессора отрицательна, как это видно на рис. 2.2, и равна

$$L_{k_{ад}} = p_1 \cdot V_1 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \text{ [Н·м] или [Дж]}$$

(давления  $p$  складываются из статической и из динамической частей).

Определим адиабатный напор (или удельную работу) компрессора

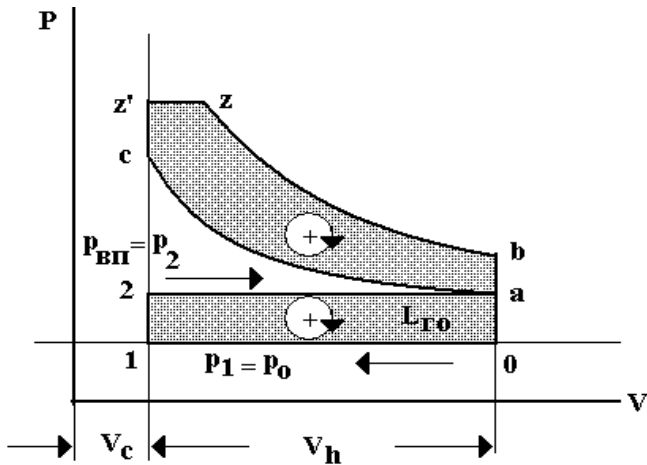


Рис. 3.1. Индикаторная диаграмма идеального цикла четырёхтактного двигателя с механическим наддувом (для 2 - х тактного опускает петля газообмена (го))

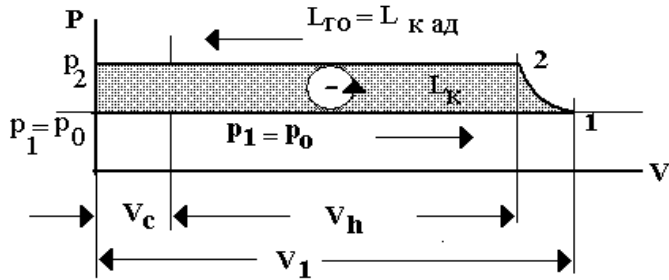


Рис. 3.2. p - V - диаграмма нагнетателя

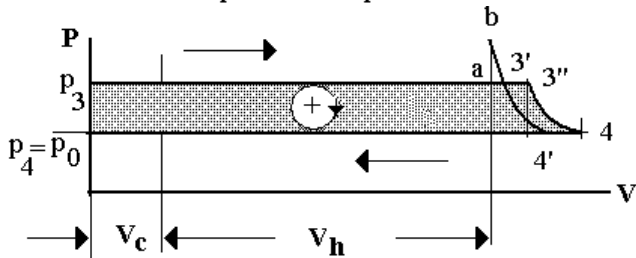


Рис. 3.3. p - V - диаграмма газовыпускной турбины



$$H_{\kappa_{a\delta}} = R \cdot T_1 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = c_p \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right];$$

если  $m$  – масса воздуха, то получаем адиабатную работу компрессора

$$L_{\kappa_{a\delta}} = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = -m \cdot H_{\kappa_{a\delta}};$$

опуская знак минус получаем работу компрессора

$$L_{\kappa} = \frac{m \cdot H_{\kappa_{a\delta}}}{\eta_{\kappa_{a\delta}}}; \text{ где } \eta_{\kappa_{a\delta}} \text{ – адиабатный КПД компрессора.}$$

Поскольку  $G_b = m/t$ , то мощность компрессора равна

$$P_{\kappa} = \frac{G_b \cdot H_{\kappa_{a\delta}}}{\eta_{\kappa_{a\delta}}} [\text{Джс/с}] \text{ или } [Bm];$$

При свободном турбонаддуве работу компрессора обеспечивает газовая турбина. Её работа определяется как

$$L_{m_{a\delta}} = m \cdot R \cdot T_3 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = m \cdot c_p \cdot T_3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right];$$

при этом,  $p_3$  как правило, меньше  $p_2$ . Для 2-х тактных ДВС должно быть  $p_3 < p_2$ , так как в этом случае возможна продувка. У 4-х тактных двигателей при малых нагрузках  $p_3 \geq p_2$ . На рис. 2.3. приведена диаграмма газовыпускной турбины. Процесс  $b-3'$  осуществляется с показателем политропы  $n$ , причём,  $1 < n < k$ . Работа  $b-3'$ -а- $b$  частично теряется, переходя в тепло, а частично увеличивает работу турбины на величину

ну 3'-3''-4-4'-3'. Т. к.  $p_4/p_3 < 1$ , то работа получается положительной.

Для расчёта мощности компрессора необходимо знать  $G_b$  для данной степени повышения давления  $p_2/p_1$ , которая определяется типом двигателя, выбранным уровнем наддува, наличием продувки и т. д.

Расчёт массового расхода воздуха через двигатель – важнейшая предпосылка для выбора компрессора.

Перед расчётом выбирают (или должны быть заданы) мощность двигателя  $P_e$  и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ . Примем, что применяемое топливо является жидким, нагнетатель сжимает только воздух. При нагнетании смеси объём топлива не учитывается (как малая величина по сравнению с объёмом воздуха).  $G_b = G_T \cdot \alpha \cdot l_0$ ;

По аналогии с удельным расходом топлива  $g_e = \frac{G_m}{P_e}$

определяем удельный расход воздуха  $g_b = \frac{G_b}{P_e}$ ;

тогда  $g_b = \frac{G_T}{P_e} \cdot \alpha \cdot l_0 = g_e \cdot \alpha \cdot l_0 = \frac{g_i}{\eta_m} \cdot \alpha \cdot l_0$  [кг/кВтч]

При отсутствии информации об индикаторном КПД двигателя его можно оценить по эмпирической формуле Ван-шейдта В. А. (предварительная оценка, без учёта степени сжатия, размеров цилиндра, вида камеры сгорания, сорта топлива и т. д.).

$\eta_i = \eta_{i_0} \cdot \alpha^{\frac{1}{\alpha}}$ , где  $\eta_{i_0} = 0,33$  – теоретическое значение при  $\alpha = 1$ .

Поскольку

$$g_e = \frac{1}{\eta_e} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кВтч}} \right] \cdot \frac{1}{H_u} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{Дж}} \right] \cdot 1000 \left[ \frac{\text{г}}{\text{кг}} \right] =$$

$$= \frac{1}{\eta_e \cdot H_u} \cdot 3,6 \cdot 10^9 \left[ \frac{\text{г}}{\text{кВтч}} \right];$$

$$\text{И также } g_i = \frac{1}{\eta_i \cdot H_u} \cdot 3,6 \cdot 10^9,$$

то принимая, что  $H_u = 41868$  [кДж/кг], получаем, что

$$g_e = \frac{3,6 \cdot 10^9}{4,1868 \cdot 10^7} \cdot \frac{1}{\eta_e} \approx \frac{86}{\eta_e} \left[ \frac{\text{г}}{\text{кВтч}} \right]; g_i \approx \frac{86}{\eta_i} \left[ \frac{\text{г}}{\text{кВтч}} \right]$$

Если двигатель имеет продувку, то расход воздуха на сгорание топлива суммируется с расходом на продувку. Т. е в этом случае вместо  $\alpha$  подставляется  $\alpha_c$ . Коэффициент продувки  $\varphi_{пр} = G_B / G_B = \alpha_c / \alpha$  должен быть задан.

Задача 3.1.

Определить удельный расход воздуха двигателем с принудительным зажиганием, если он работает при  $\alpha=1,0$  и расходует  $0,30$  кг /кВтч топлива, для которого  $l_0 = 14,5$  кг возд./кг топл.

Решение.

$$g_B = g_e \cdot \alpha \cdot l_0 = 0,30 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кВтч}} \right] \cdot 1 \cdot 14,5 \left[ \frac{\text{кгвозд.}}{\text{кг}} \right] = 4,35 \left[ \frac{\text{кгвозд.}}{\text{кВтч}} \right].$$

Задача 3.2.

Определить удельный расход воздуха 4-х тактным двигателем с принудительным зажиганием без наддува, если  $\alpha = 1,05$ ,  $\eta_m = 0,82$ ,  $g_i = 0,235$  кг/кВтч,  $l_0 = 14,5$  кг/кг.

Решение.

Удельный расход воздуха находим по уравнению

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_M} \cdot \alpha \cdot l_0; \quad g_e = 0,235 \cdot 1,05 \cdot 14,5 / 0,82 = 4,36 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \right];$$

Задача 3.3.

Определить удельный расход воздуха 4-х тактным двигателем с принудительным зажиганием без наддува, если  $\alpha = 1,05$ ,  $\eta_M = 0,82$ ,  $l_0 = 14,5 \text{ кг/кг}$ .

Решение.

Удельный расход воздуха находим по уравнению

$$g_e \approx \frac{86}{\eta_i} \cdot \frac{1}{\eta_M} \cdot \alpha \cdot l_0 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \right];$$

Оценим индикаторный КПД по соотношению

$$\eta_i = \eta_{i_0} \cdot \alpha^\alpha = 0,33 \cdot 1,05^{1,05} = 0,35;$$

$$\text{Тогда } g_e \approx \frac{86}{0,35} \cdot \frac{1}{0,82} \cdot 1,05 \cdot 14,5 \cdot 0,001 = 4,6 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \right].$$

Задача 3.4.

Определить удельный расход воздуха 4-х тактным предкамерным малоразмерным дизелем без наддува и продувки, если  $\alpha = 1,32$ ,  $\eta_M = 0,85$ ,  $l_0 = 14,3 \text{ кг/кг}$ ,  $g_e = 0,23 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$ .

(Ответ: 4,34 кг/кВт·ч).

Задача 3.5.

Определить удельный расход воздуха 4-х тактным среднеразмерным дизелем без наддува и продувки, если  $\alpha = 1,68$ ,  $\eta_M = 0,86$ ,  $l_0 = 14,3 \text{ кг/кг}$ ,  $g_e = 0,192 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$ .

(Ответ: 4,61 кг/кВт·ч).

Задача 3.6.

Определить удельный расход воздуха 4-х тактным двигателем с принудительным зажиганием без наддува и продувки, если  $\alpha=1,05$ ,  $\eta_m=0,82$ ,  $l_0=14,5$ кг/кг,  $H_u = 4,1870 \cdot 10^7$ [Дж/кг].

(Ответ: 4,63 кг/кВт·ч).

Задача 3.7.

Определить удельный расход воздуха двухтактным судовым крупным дизелем без наддува, но с продувкой, если  $\alpha = 2,0$ ,  $\eta_m=0,86$ ,  $l_0=14,2$ кг/кг,  $g_i=0,183$ кг/кВтч, причём, коэффициент продувки

$$\varphi_{пр} = G_{вс} / G_{в} = \alpha_c / \alpha = 1,4.$$

(Ответ: 8,47 кг/кВт·ч).

Задача 3.8.

Определить удельный расход воздуха двухтактным судовым крупным дизелем с наддувом и с продувкой, если  $\alpha = 2,2$ ,  $\eta_m=0,85$ ,  $l_0=14,3$ кг/кг, причём, коэффициент продувки  $\varphi_{пр} = G_{вс} / G_{в} = \alpha_c / \alpha = 1,4$ ,  $H_u=42500$  кДж/кг.

(Ответ: 9,33 кг/кВт·ч).

Задача 3.9.

Определить удельный расход воздуха двухтактным высокооборотным малоразмерным бензиновым двигателем (для мотороллера) с принудительным зажиганием, с продувкой, если  $\alpha=0,95$ ,  $\eta_m=0,75$ ,  $l_0=14,6$ кг/кг,  $g_i=430$ г/кВтч, причём, коэффициент продувки  $\varphi_{пр} = G_{вс} / G_{в} = \alpha_c / \alpha = 1,1$ .

(Ответ: 8,74 кг/кВт·ч).

## Задача 3.10.

Определить потребляемую мощность компрессора для двигателя с механическим наддувом (без продувки) если известно следующее:  $P_e=100\text{кВт}$ ,  $H_{\text{к ад}}=4\cdot 10^4$  Н·м/кг (соответствует давлению наддува 1,55 бар);  $\eta_{\text{к ад}}=0,55$ ;  $\alpha=1,1$ ;  $g_e=0,238$  кг/кВт·ч;  $l_0=14,5$  кг/кг.

Решение.

Мощность компрессора определяем по соотношению

$$P_{\text{к}} = \frac{g_e \cdot P_e \cdot H_{\text{к ад}}}{3600 \eta_{\text{к ад}}} = \frac{g_e \cdot \alpha \cdot l_0 \cdot P_e \cdot H_{\text{к ад}}}{3600 \eta_{\text{к ад}}};$$

Тогда

$$P_{\text{к}} = \frac{0,238 \cdot 1,1 \cdot 14,5 \cdot 100 \cdot 4 \cdot 10^4}{3600 \cdot 0,55} = 7669 \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right] = 7,669 \text{ кВт}.$$

## Задача 3.11.

Определить потребляемую мощность компрессора для двигателя с механическим наддувом (без продувки) если известно следующее:  $P_e=120\text{кВт}$ ,  $H_{\text{к ад}}=4,1\cdot 10^4$  Н·м/кг (соответствует давлению наддува 1,55 бар);  $\eta_{\text{к ад}}=0,5$ ;  $\alpha=1,5$ ;  $g_e=0,220$  кг/кВт·ч;  $l_0=14,3$  кг/кг.

(Ответ: 12,9 кВт).

## Задача 3.12.

Определить потребляемую мощность компрессора для двигателя с механическим наддувом (без продувки) если известно следующее:  $P_e=200\text{кВт}$ ,  $H_{\text{к ад}}=6\cdot 10^4$  Н·м/кг (соответствует давлению наддува 2,1 бар);  $\eta_{\text{к ад}}=0,56$ ;  $\alpha=1,4$ ;  $g_e=0,215$  кг/кВт·ч;  $l_0=14,5$  кг/кг.

(Ответ: 26 кВт).

#### 4. Турбокомпрессоры

Задача 4.1.

Определить мощность турбины турбокомпрессора наддува четырёхтактного дизеля, если коэффициент избытка воздуха  $\alpha=1,5$ , параметры воздуха на входе в компрессор равны:  $p_0=1$  бар,  $t_0=18^\circ\text{C}$ , а давление воздуха на выходе из компрессора  $p_k=1,6$  бар, при этом расход выпускных газов составляет  $G_\Gamma=950$  кг/ч. Эффективные КПД турбины и компрессора составляют соответственно  $\eta_\Gamma=72\%$ ,  $\eta_k=68\%$ . Дизель использует топливо следующего состава: С-0,87; Н-0,126; О-0,004.

Решение.

Известно, что для случая турбокомпрессора мощности турбины и компрессора равны, т. е.  $P_\Gamma=P_k$ . Мощность компрессора определим по соотношению

$$P_k = N_{k_{ад}} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot G_B \right] / \eta_k = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right] = \left[ \text{Вт} \right]$$

$$N_{k_{ад}} = R \cdot T_0 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[ \frac{(k-1)/k}{k} - 1 \right]$$

$$= 0,287[\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}] \cdot 291[\text{К}] \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \left[ \left( \frac{1,6}{1,0} \right)^{\frac{4-1}{1,4}} - 1 \right] =$$

$$= 1,005 \cdot 291 \cdot 0,144 = 42,11[\text{кДж}/\text{кг}];$$

$$\text{Поскольку } \frac{G_\Gamma}{G_B} = 1 + \frac{1}{\alpha \cdot l_0}; \text{ то } G_B = \frac{G_\Gamma}{1 + 1/(\alpha \cdot l_0)};$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \cdot \left[ \frac{8}{3} \cdot 0,87 + 8 \cdot 0,126 - 0,004 \right] = 14,45 [\text{кг} / \text{кг}];$$

$$G_g = \frac{950}{1 + 1/(1,5 \cdot 14,5)} = 908,2 [\text{кг} / \text{ч}] = 0,2523 [\text{кг} / \text{с}];$$

И тогда окончательно получаем, что

$$P_k = \frac{42,11 \cdot 0,2523}{0,68} = 15,62 [\text{кВт}].$$

#### Задача 4.2.

Определить мощность турбины турбокомпрессора наддува четырёхтактного дизеля, если коэффициент избытка воздуха  $\alpha=1,7$ , параметры воздуха на входе в компрессор равны:  $p_0=1$  бар,  $t_0=22^{\circ}\text{C}$ , а давление воздуха на выходе из компрессора  $p_k=1,55$  бар. При этом расход выпускных газов составляет  $G_T=960$  кг/ч. Эффективные КПД турбины и компрессора составляют соответственно  $\eta_T=70\%$ ,  $\eta_k=66\%$ . Дизель использует топливо следующего состава: С-0,860; Н-0,136; О-0,004.

(Ответ: 15,4 кВт).

#### Задача 4.3.

Определить мощность турбины турбокомпрессора наддува четырёхтактного дизеля, если коэффициент избытка воздуха  $\alpha=1,4$ , параметры воздуха на входе в компрессор равны:  $p_0=1,05$  бар,  $t_0=25^{\circ}\text{C}$ , а давление воздуха на выходе из компрессора  $p_k=1,7$  бар. При этом расход выпускных газов составляет  $G_T=970$  кг/ч. Эффективные КПД турбины и компрессора составляют соответственно  $\eta_T=73\%$ ,  $\eta_k=69\%$ . Дизель использует топливо следующего состава: С-0,875; Н-0,121; О-0,004.

(Ответ: 18,2 кВт)



## Задача 4.4.

Определить мощность турбины турбокомпрессора наддува четырёхтактного дизеля, если коэффициент избытка воздуха  $\alpha=2,0$ , параметры воздуха на входе в компрессор равны:  $p_0=0,95$  бар,  $t_0=20^\circ\text{C}$ , а давление воздуха на выходе из компрессора  $p_k=2,2$  бар. При этом расход выпускных газов составляет  $G_T=1250$  кг/ч. Эффективные КПД турбины и компрессора составляют соответственно  $\eta_T=70\%$ ,  $\eta_k=67\%$ . Дизель использует топливо следующего состава: С-0,865; Н-0,13; О-0,005.

(Ответ: 37,3 кВт).

## Задача 4.5.

Определить мощность турбины турбокомпрессора наддува четырёхтактного дизеля, если коэффициент избытка воздуха  $\alpha=1,35$ , параметры воздуха на входе в компрессор равны:  $p_0=1$  бар,  $t_0=15^\circ\text{C}$ , а давление воздуха на выходе из компрессора  $p_k=1,55$  бар, при этом расход выпускных газов составляет  $G_T=955$  кг/ч. Эффективные КПД турбины и компрессора составляют соответственно  $\eta_T=74\%$ ,  $\eta_k=69\%$ . Дизель использует топливо следующего состава: С-0,867; Н-0,129; О-0,004.

(Ответ: 14,1 кВт).

## Задача 4.6.

Для четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом имеется следующая информация о номинальном режиме его работы: расход воздуха двигателем  $G_B=3600$  кг/ч; часовой расход топлива  $G_T=144$  кг/ч; КПД компрессора  $\eta_k=0,75$ ; коэффициент нагрева турбокомпрессора  $\tau_{тк}=1,317$ ; давление перед турбиной  $p_T=1,8$  бар; температура газов перед турби-

ной равна  $t_T=427$  °С. Определить мощность турбины, если условия окружающей среды следующие:  $p_0=1$ бар;  $t_0=15$  °С.

Решение.

Мощность турбины определяется по соотношению

$$P_T = N_{T_{ад}} \cdot G_T \cdot \eta_T; \text{ где}$$

$$G_T = G_B + G_{T'} = 3600 + 144 = 3744[\text{кг/ч}] = 1,04[\text{кг/с}];$$

Поскольку  $\eta_{TK} = \eta_T \cdot \eta_K$ ; и в то же время

$$\eta_{TK} = \frac{\tau_{TK}}{1,512 \cdot \left(\frac{T_T}{T_0}\right) \cdot \left(\frac{G_T}{G_B}\right)} = \frac{1,317}{1,512 \cdot \left(\frac{00}{288}\right) \cdot \left(\frac{04}{1}\right)}$$

0,4526;

Следовательно

$$\eta_T = \frac{\eta_{TK}}{\eta_K} = \frac{0,4526}{0,75} = 0,6034$$

$$N_{T_{ад}} = R \cdot T_T \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta_T^{(k-1)/k}}\right) =$$

$$= 0,287[\text{кДж/кг} \cdot \text{К}] \cdot 700[\text{К}] \cdot \frac{1,33}{1,33-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{p_T}{p_0}\right)^{0,25}}\right) =$$

$$= 0,287 \cdot 700 \cdot 4,03 \cdot \left(1 - \frac{1}{1,8^{0,25}}\right) = 110,64[\text{кДж/кг}];$$

Тогда

$$P_T = 110,64 \cdot 1,04 \cdot 0,6034 = 69,43 [\text{кВт}].$$

#### Задача 4.7.

Для четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом имеется следующая информация о номинальном режиме его работы: расход воздуха двигателем  $G_B=4200$  кг/ч; часовой расход топлива  $G_T=153$  кг/ч; КПД компрессора  $\eta_k=0,76$ ; коэффициент нагрева турбокомпрессора  $\tau_{\text{тк}}=1,321$ ; давление перед турбиной  $p_T=1,85$  бар; температура газов перед турбиной равна  $t_T=447$  °С. Определить мощность турбины, если условия окружающей среды следующие:  $p_0=1$  бар;  $t_0=20$  °С.

(Ответ: 64,3 кВт).

#### Задача 4.8.

Для четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом имеется следующая информация о номинальном режиме его работы: расход воздуха двигателем  $G_B=2800$  кг/ч; часовой расход топлива  $G_T=112$  кг/ч; КПД компрессора  $\eta_k=0,74$ ; коэффициент нагрева турбокомпрессора  $\tau_{\text{тк}}=1,315$ ; давление перед турбиной  $p_T=1,78$  бар; температура газов перед турбиной равна  $t_T=438$  °С. Определить мощность турбины, если условия окружающей среды следующие:  $p_0=1$  бар;  $t_0=18$  °С.

(Ответ: 41 кВт).

### 5.6. Взаимосвязь между массовым расходом воздуха и мощностью двигателя

#### Задача 6.1.

Определить эффективную мощность четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом, если его воздушно – топливное отношение равно 25 кг/кг, эффективный КПД ( $\eta_e$ ) составляет 38%, механический к. п. д. компрессора ( $\eta_{\text{мк}}$ ) ра-

вен 96 %, мощность, развиваемая турбиной ( $P_T$ ), равна 18,4 кВт, а температура воздуха на выходе из компрессора равна 80 °С. При этом примем, что условия окружающей среды следующие:  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 20$  °С. Низшая теплота сгорания топлива ( $H_u$ ) равна 42470 кДж/кг.

Решение.

Мощность двигателя может быть определена из соотношения

$$P_e = (G_T/g_e) \cdot 10^3 \text{ [кВт]}.$$

$$g_e = (3600 \cdot 10^3)/(H_u \cdot \eta_e) = (3600 \cdot 10^3)/(42470 \cdot 0,38) = 223 \text{ [г/кВтч]}.$$

$$G_T = G_T - G_B.$$

$$G_T = G_B \cdot (1 + 1/(\alpha l_0)) = G_B \cdot (1 + 1/25) = 1,04 G_B.$$

$$\text{Следовательно: } G_T = G_T - G_B = 0,04 G_B.$$

Прежде, чем находить  $P_e$ , необходимо определить расход воздуха  $G_B$ . Для компрессора турбонагнетателя имеем:

$P_k = G_B \cdot H_k / \eta_{mk}$ , где  $H_k$  – адиабатический напор компрессора,  $\eta_{mk}$  – механический КПД компрессора.

$$H_k = R \cdot T_1 \cdot k / (k-1) [(\pi_k^{(k-1)/k} - 1)] = R \cdot T_1 \cdot k / (k-1) (T_k / T_1 - 1) =$$

$$= 287 \text{ [Дж/(кг·К)]} \cdot 293 \text{ [К]} \cdot 1,4 / 0,4 \cdot [(353/293) - 1] =$$

$$= 60270 \text{ [Дж/кг]} = 60,27 \text{ [кДж/кг]}$$

$$G_B = \eta_{mk} \cdot P_k / H_k; P_k = P_T = 18,4 \text{ кВт}.$$

$$G_B = 0,96 \cdot 18,4 \text{ [кВт]} / 60,27 \text{ [кДж/кг]} = 0,293 \text{ [кг/с]}. (1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ кДж}).$$

$$G_T = 0,04 \cdot 0,293 \cdot 3600 = 42,2 \text{ кг/ч};$$

$$P_e = 42,2 \cdot 1000 / 223 = 189,2 \text{ [кВт]}.$$

Задача 6.2.

Определить эффективную мощность четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом, если коэффициент избытка воздуха равен 1,5, эффективный КПД ( $\eta_e$ ) составляет 45%,

механический к. п. д. компрессора ( $\eta_{мк}$ ) равен 98 %, мощность, развиваемая турбиной ( $P_T$ ), равна 17,8 кВт, а температура воздуха на выходе из компрессора равна 85 °С. При этом примем, что условия окружающей среды следующие:  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 25$  °С. Низшая теплота сгорания топлива ( $H_u$ ) равна 42500 кДж/кг,  $l_0 = 14,3$  кг/кг.

(Ответ: 267,8 кВт).

#### Задача 6.3.

Определить эффективную мощность четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом, если его воздушно – топливное отношение равно 28 кг/кг, эффективный КПД ( $\eta_e$ ) составляет 48%, механический к. п. д. компрессора ( $\eta_{мк}$ ) равен 98 %, мощность, развиваемая турбиной ( $P_T$ ), равна 38,2 кВт, а температура воздуха на выходе из компрессора равна 78 °С. При этом примем, что условия окружающей среды следующие:  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 20$  °С. Низшая теплота сгорания топлива ( $H_u$ ) равна 42200 кДж/кг.

(Ответ: 162 кВт).

#### Задача 6.4.

Определить эффективную мощность четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом, если коэффициент избытка воздуха равен 1,4, эффективный КПД ( $\eta_e$ ) составляет 43%, механический к. п. д. компрессора ( $\eta_{мк}$ ) равен 97 %, мощность, развиваемая турбиной ( $P_T$ ), равна 15,8 кВт, а температура воздуха на выходе из компрессора равна 78 °С. При этом примем, что условия окружающей среды следующие:  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 15$  °С. Низшая теплота сгорания топлива ( $H_u$ ) равна 42600 кДж/кг,  $l_0 = 14,5$  кг/кг.

(Ответ: 217 кВт).

---

---

**Задача 6.5.**

Определить эффективную мощность четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом, если коэффициент избытка воздуха равен 1,55, эффективный КПД ( $\eta_e$ ) составляет 46%, механический к. п. д. компрессора ( $\eta_{мк}$ ) равен 96 %, мощность, развиваемая турбиной ( $P_T$ ), равна 18,2 кВт, а температура воздуха на выходе из компрессора равна 84 °С. При этом примем, что условия окружающей среды следующие:  $p_0=1$  бар,  $t_0=15$  °С. Низшая теплота сгорания топлива ( $H_u$ ) равна 42800 кДж/кг,  $I_0=14,4$  кг/кг.

(Ответ: 222,5 кВт).

**Задача 6.6.**

Определить эффективную мощность четырёхтактного дизеля с газотурбинным наддувом, если коэффициент избытка воздуха равен 1,38, эффективный КПД ( $\eta_e$ ) составляет 40%, механический к. п. д. компрессора ( $\eta_{мк}$ ) равен 95 %, мощность, развиваемая турбиной ( $P_T$ ), равна 16,5 кВт, а температура воздуха на выходе из компрессора равна 77 °С. При этом примем, что условия окружающей среды следующие:  $p_0 = 1$  бар,  $t_0= 15$  °С. Низшая теплота сгорания топлива ( $H_u$ ) равна 42500 кДж/кг,  $I_0=14,4$  кг/кг.

(Ответ: 217 кВт).

**7. Среднее индикаторное давление****Задача 7.1.**

Четырёхтактный карбюраторный двигатель с наддувом подвергается испытаниям на режиме постоянной частоты вращения, равной 5000 об/мин, при изменении положения дроссельной заслонки (регистрируется нагрузочная характеристика). При этих испытаниях получен график, показанный на рисунке 7.1.

Испытания содержат 5 режимных точек. Результаты измерений на первом режиме следующие:  $\alpha = 1,0$ ;  $\eta_v = 0,73$ ;  $P_i = 144,5$  кВт. При измерениях на втором режиме получено, что произошло обогащение смеси на 10%, а коэффициент наполнения снизился на 5%, сравнительно с первым.

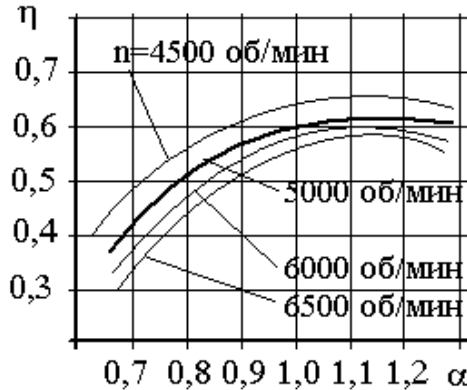


Рис. 7.1. Зависимость индикаторного к.п.д. ( $\eta_i$ ) от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ )

Решение.

Известно, что для четырехтактного двигателя

$$P_i = \frac{p_{mi} [\text{МПа}] \cdot i \cdot V_h [\text{л}] \cdot n [\text{об/мин}]}{120} = [\text{кВт}];$$

следовательно  $p_{mi} = \frac{120 \cdot P_i}{i \cdot V_h \cdot n}$  [МПа]; и тогда для первого

измерения имеем:  $p_{mi} = \frac{120 \cdot 144,5}{2,2 \cdot 5000} = 1,576$  [МПа];

Определить величину среднего индикаторного давления для второго испытания, если известно, что рабочий объем двигателя равен 2,2 л. Известно также, что

$$p_{m_i} = 10^{-3} \left( \frac{H_u}{l_0} \right) \cdot \left( \frac{\eta_i}{\alpha} \right) \cdot \rho_k \cdot \eta_v;$$

Если воспользуемся отношением параметров первого и второго измерений, то получаем:

$$p_{m_{i_2}} = \left( \frac{\eta_{i_2}}{\eta_{i_1}} \right) \cdot \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \cdot \left( \frac{\eta_{v_2}}{\eta_{v_1}} \right) \cdot p_{m_{i_1}};$$

Для первого измерения из графика получаем, что  $\eta_{i_1} = 0,60$ .

Во втором измерении получено, что  $\alpha_2 = 1 - 0,1 = 0,9$ ;  $\eta_{v_2} = (1 - 0,05) \cdot 0,73 = 0,6935$ ; из графика получаем:  $\eta_{i_2} = 0,56$ .

Следовательно после подстановки получаем:

$$p_{m_{i_2}} = \frac{0,56 \cdot 1,0 \cdot 0,6935 \cdot 1,576}{0,6 \cdot 0,9 \cdot 0,73} = 1,55 \text{ [МПа]}.$$

Задача 7.2. Четырёхтактный карбюраторный двигатель с наддувом подвергается испытаниям на режиме постоянной частоты вращения, равной 4500 об/мин при изменении положения дроссельной заслонки (регистрируется нагрузочная характеристика). При этих испытаниях получен график, показанный на рисунке. (Рис. 7.1.). Испытания содержат 5 режимных точек. Результаты измерений на первом режиме следующие:  $\alpha = 1,05$ ;  $\eta_v = 0,75$ ;  $P_i = 134,2$  кВт.

При измерениях на втором режиме получено, что произошло обогащение смеси на 15%, а коэффициент наполнения снизился на 7%, сравнительно с первым.

Определить величину среднего индикаторного давления для второго испытания, если известно, что рабочий объём двигателя равен 2,0 л.



=====  
(Ответ: 1,81 МПа).

Задача 7.3. Четырёхтактный карбюраторный двигатель с наддувом подвергается испытаниям на режиме постоянной частоты вращения, равной 6000 об/мин при изменении положения дроссельной заслонки (регистрируется нагрузочная характеристика). При этих испытаниях получен график, показанный на рисунке. (Рис. 7.1.). Испытания содержат 5 режимных точек. Результаты измерений на первом режиме следующие:  $\alpha = 1,1$ ;  $\eta_v = 0,76$ ;  $P_i = 124,6$  кВт.

При измерениях на втором режиме получено, что произошло обогащение смеси на 12%, а коэффициент наполнения снизился на 6%, сравнительно с первым.

Определить величину среднего индикаторного давления для второго испытания, если известно, что рабочий объём двигателя равен 1,9 л.

(Ответ: 1,55 МПа).

Задача 7.4. Четырёхтактный карбюраторный двигатель с наддувом подвергается испытаниям на режиме постоянной частоты вращения, равной 6500 об/мин, при изменении положения дроссельной заслонки (регистрируется нагрузочная характеристика). При этих испытаниях получен график, показанный на рисунке. (Рис. 7.1.). Испытания содержат 5 режимных точек. Результаты измерений на первом режиме следующие:  $\alpha = 0,95$ ;  $\eta_v = 0,7$ ;  $P_i = 144,1$  кВт.

При измерениях на втором режиме получено, что произошло обогащение смеси на 9%, а коэффициент наполнения снизился на 4%, сравнительно с первым.

Определить величину среднего индикаторного давления для второго испытания, если известно, что рабочий объём двигателя равен 2,3 л.

(Ответ: 1,042 МПа).

Задача 7.5.

Двухтактный бензиновый двигатель с числом цилиндров  $i=2$  работает с частотой вращения  $n=5200 \text{ мин}^{-1}$  с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha=0,9$  и имеет коэффициент наполнения  $\eta_v=70\%$ . При этом его расход топлива составляет  $G_T=2,6 \text{ кг/ч}$ ,  $l_o=15 \text{ кг/кг}$ . Двигатель имеет кривошипно-камерную продувку и наддув со степенью повышения давления  $p_k/p_o=1,2$ . Показатель политропы сжатия  $n_k=1,45$ . Геометрический рабочий объём цилиндров равен  $i \cdot V_h=167,32 \text{ см}^3$ . Плотность поступающего в кривошипную камеру воздуха равна  $\rho_o=1,21 \text{ кг/м}^3$ .

Определить, какую долю потерянного хода имеет двигатель в процессе продувки – наполнения?

Решение.

Известно, что доля потерянного хода равна

$$\psi_n = \frac{V_n}{V_h} = \frac{V_h - V_h'}{V_h} = 1 - \frac{V_h'}{V_h};$$

$$V_h = \frac{i \cdot V_h}{i} = \frac{167,32}{2} = 83,66 \text{ см}^3;$$

Воспользуемся уравнением коэффициента наполнения

$$\eta_v = \frac{\alpha \cdot l_o \cdot G_T}{60 \cdot i \cdot V_h' \cdot \rho_k \cdot n};$$

$$\text{Отсюда получаем, что } V_h' = \frac{\alpha \cdot l_o \cdot G_T}{60 \cdot i \cdot \eta_v \cdot \rho_k \cdot n};$$

Определим плотность продувочного заряда

$$\frac{\rho_K}{\rho_o} = \frac{p_K}{p_o} \cdot \frac{T_o}{T_K} = \frac{p_K}{p_o} \cdot \frac{T_o}{T_o \cdot \left(\frac{p_K}{p_o}\right)^{(n_K-1)/n_K}} = \left(\frac{p_K}{p_o}\right)^{1/n_K};$$

Отсюда

$$\rho_K = \left(\frac{p_K}{p_o}\right)^{1/n_K} \cdot \rho_o = (1,2)^{1/1,45} \cdot 1,21 = 1,372 \text{ кг/м}^3;$$

Следовательно

$$V_h' = \frac{0,9 \cdot 15 \cdot 2,6}{60 \cdot 2 \cdot 1,372 \cdot 5200 \cdot 0,7} = 5,857 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 = 58,57 \text{ см}^3;$$

Тогда окончательно получаем

$$\psi_n = 1 - \frac{58,57}{83,66} = 0,30.$$

Задача 7.6.

Двухтактный бензиновый двигатель с числом цилиндров  $i=1$  работает с частотой вращения  $n=5500 \text{ мин}^{-1}$  с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha=0,95$  и имеет коэффициент наполнения  $\eta_v=72\%$ . При этом его расход топлива составляет  $G_T=1,4 \text{ кг/ч}$ . Двигатель имеет кривошипно-камерную продувку и наддув со степенью повышения давления  $p_K/p_o=1,18$ . Показатель политропы сжатия  $n_K=1,44$ . Геометрический рабочий объём цилиндра равен  $V_h=84,2 \text{ см}^3$ . Плотность поступающего в кривошипную камеру воздуха равна  $\rho_o=1,208 \text{ кг/м}^3$ .

Определить, какую долю потерянного хода имеет двигатель в процессе продувки – наполнения, если для применяемого топлива  $l_o=15,2 \text{ кг/кг}$  ?

(Ответ: 0,25).

## Задача 7.7.

Двухтактный бензиновый двигатель с числом цилиндров  $i=4$  работает с частотой вращения  $n=6000 \text{ мин}^{-1}$ , с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha=1,0$  и имеет коэффициент наполнения  $\eta_v=0,71$ . При этом его расход топлива составляет  $G_T=5,6 \text{ кг/ч}$ . Двигатель имеет кривошипно-камерную продувку и наддув со степенью повышения давления  $p_k/p_o=1,22$ . Показатель политропы сжатия  $n_k=1,43$ . Геометрический рабочий объём цилиндров равен  $i \cdot V_h=340,5 \text{ см}^3$ . Плотность поступающего в кривошипную камеру воздуха равна  $\rho_o=1,20 \text{ кг/м}^3$ ,  $l_o=14,9 \text{ кг/кг}$ .

Определить, какую долю потерянного хода имеет двигатель в процессе продувки – наполнения?

(Ответ: 0,3).

## 8. Специальные системы наддува

## Задача 8.1.

У дизеля со свободным газотурбинным наддувом при работе на номинальном режиме компрессор имеет адиабатный КПД  $\eta_{к_ад}=65\%$ , а газовая турбина производит удельную работу  $L_T=78 \text{ кДж/кг}$ .

Определить давление воздуха, которое получается на выходе из компрессора, если известно следующее: расход топлива  $G_T=44 \text{ кг/ч}$ ;  $\alpha=1,8$ ; двигатель использует топливо следующего состава по массе: 0,86 С; 0,135 Н; 0,005 О, (С+Н+О=1,000), причём,  $p_o=1 \text{ бар}$ , а  $t_o=20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Решение.

Давление воздуха на выходе из компрессора определяется по соотношению:  $P_K = P_0 \cdot \pi_K$ , где  $\pi_K$  – степень повышения давления в ТК.

Величину  $\pi_K$  определим из уравнения удельной работы компрессора (её ещё называют напором компрессора)

$$\begin{aligned} H_{Kад} &= R \cdot T_1 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \\ &= 0,287 \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right] \cdot T_1 \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \left[ \pi_K^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = \\ &= 1,004 \cdot T_1 \cdot (\pi_K)^{0,286} - 1 \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right]; \end{aligned}$$

$$\text{Тогда: } \pi_K = \left[ \frac{H_{Kад}}{1,004 \cdot T_1} + 1 \right]^{1/0,286};$$

Поскольку мощность компрессора равна

$$P_K = \frac{H_{Kад} \cdot G_в}{\eta_{Kад}}, \text{ то } H_{Kад} = \frac{P_K \cdot \eta_{Kад}}{G_в}; \text{ а расход воздуха}$$

определим как  $G_в = \alpha \cdot I_0 \cdot G_T$ ;

$$\text{здесь } I_0 = \frac{1}{0,23} \left[ \frac{8}{3} \cdot 0,86 \right] \cdot 8 \cdot 0,135 \cdot 0,005 = 14,645 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right];$$

$$G_в = 1,8 \cdot 14,645 \cdot 44 = 1160 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \right] = 0,3222 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right];$$

$$G_T = G_в + G_T = 1160 + 44 = 1204 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \right] = 0,33444 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right];$$

$$P_K = P_T = G_T \cdot L_T = 0,33444 \cdot 78 = 26,09 \text{ [кВт]};$$

Тогда адиабатный напор компрессора или, иначе, удельную работу компрессора определим как

$$H_{Kад} = \frac{26,09 \cdot 0,65}{0,3222} = 52,63 \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right];$$

Тогда степень повышения давления определится как

$$\pi_K = \left[ \frac{52,63}{0,004 \cdot 293} + 1 \right]^{1/0,286} = 1,778;$$

И, наконец, давление наддува составит

$$p_K = 1 \cdot 1,778 = 1,778 \text{ [ар]}.$$

### Задача 8.2.

При работе на номинальном режиме компрессор дизеля со свободным газотурбинным наддувом имеет адиабатный КПД  $\eta_{Kад} = 68\%$ , а газовая турбина производит удельную работу (или, иначе, имеет напор)  $L_T$  или  $H_T = 78$  кДж/кг.

Определить давление воздуха, которое достигается на выходе из компрессора, если известно следующее: расход топлива дизелем составляет  $G_T = 46$  кг/ч;  $\alpha = 1,6$ ; двигатель использует топливо следующего состава: С-0,87; Н-0,126; О-0,004, причём,  $p_0 = 1$  бар, а  $t_0 = 15$  °С.

(Ответ: 1,7 бар).

### Задача 8.3.

При работе на номинальном режиме компрессор дизеля со свободным газотурбинным наддувом имеет адиабатный КПД  $\eta_{Kад} = 64\%$ , а газовая турбина производит удельную работу (или, иначе, имеет напор)  $L_T$  или  $H_T = 98$  кДж/кг.

Определить давление воздуха, которое достигается на выходе из компрессора, если известно следующее: расход

топлива дизелем составляет  $G_T=59$  кг/ч;  $\alpha=1,5$ ; двигатель использует топливо следующего состава: С-0,86; Н-0,135; О-0,005, причём,  $p_0=1$  бар, а  $t_0=25$  °С.

(Ответ: 2,0 бар).

#### Задача 8.4.

При работе на номинальном режиме компрессор дизеля со свободным газотурбинным наддувом имеет адиабатный КПД  $\eta_{к_{ад}}=72\%$ , а газовая турбина производит удельную работу (или, иначе, имеет напор)  $L_{Т или Н_{Т}}=88$  кДж/кг.

Определить давление воздуха, которое достигается на выходе из компрессора, если известно следующее: расход топлива дизелем составляет  $G_T=49$  кг/ч;  $\alpha=1,55$ ; двигатель использует топливо следующего состава: С-0,87; Н-0,125; О-0,005, причём,  $p_0=1$  бар, а  $t_0=20,5$  °С.

(Ответ: 2,032 бар).

#### Задача 8.5.

При работе на номинальном режиме компрессор дизеля со свободным газотурбинным наддувом имеет адиабатный КПД  $\eta_{к_{ад}}=70\%$ , а газовая турбина производит удельную работу (или, иначе, имеет напор)  $L_{Т или Н_{Т}}=80$  кДж/кг.

Определить давление воздуха, которое достигается на выходе из компрессора, если известно следующее: расход топлива дизелем составляет  $G_T=49$  кг/ч;  $\alpha=1,4$ ; двигатель использует топливо следующего состава: С-0,872; Н-0,124; О-0,004, причём,  $p_0=1$  бар, а  $t_0=15$  °С.

(Ответ: 1,89 бар).

#### Задача 8.6.

При работе на номинальном режиме компрессор дизеля со свободным газотурбинным наддувом имеет адиабатный КПД  $\eta_{\kappa_{ад}} = 71\%$ , а газовая турбина производит удельную работу (или, иначе, имеет напор)  $L_T \text{ или } H_T = 58$  кДж/кг.

Определить давление воздуха, которое достигается на выходе из компрессора, если известно следующее: расход топлива дизелем составляет  $G_T = 39$  кг/ч;  $\alpha = 1,46$ ; в двигателе используется топливо следующего состава: С-0,871; Н-0,125; О-0,004, причём,  $p_0 = 1$  бар, а  $t_0 = 30^\circ\text{C}$ .

(Ответ: 1,59 бар).

#### Задача 8.7.

При работе на номинальном режиме компрессор дизеля со свободным газотурбинным наддувом имеет адиабатный КПД  $\eta_{\kappa_{ад}} = 66,5\%$ , а газовая турбина производит удельную работу  $L_T \text{ или } H_T = 68$  кДж/кг.

Определить давление воздуха, которое достигается на выходе из компрессора, если известно следующее: расход топлива дизелем составляет  $G_T = 43$  кг/ч;  $\alpha = 1,58$ ; двигатель использует топливо следующего состава: С-0,787; Н-0,209; О-0,004, причём,  $p_0 = 1$  бар, а  $t_0 = 15^\circ\text{C}$ .

(Ответ: 1,693 бар).

#### Задача 8.8.

Четырёхтактный дизель с газотурбинным наддувом работает на номинальном режиме. При этом ТК имеет следующие показатели работы.

Давление и температура окружающей среды:  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  соответственно.

Температура воздуха на выходе из компрессора  $t_{\kappa} = 70^\circ\text{C}$ ; давление перед турбиной  $p_T = 0,154$  МПа;



механический КПД компрессора  $\eta_{мк} = 95\%$ ;  
 полный КПД турбины  $\eta_T = 63\%$ ;  
 коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,8$ , а  $l_0 = 14,5$  кг/кг.  
 Определить температуру газов перед турбиной на этом  
 режиме работы.

Решение.

Температуру газа перед турбиной определим из уравнения  
 удельной работы (или напора) турбины.

$$\begin{aligned}
 H_{T_{ад}} &= R \cdot T_T \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_T}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \\
 &= 0,287 \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right] \cdot T_T \cdot \frac{1,33}{1,33-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{\delta \cdot 1,33} \right) \right] = \\
 &= 1,157 \cdot T_T \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{\delta^{0,25}} \right) \right], \text{ где } \delta = \frac{p_T}{p_0} = \frac{0,154}{0,1} = 1,54.
 \end{aligned}$$

Тогда

$$T_T = \frac{H_{T_{ад}}}{1,157 \cdot \left( 1 - \frac{1}{1,54^{0,25}} \right)};$$

Т. к.  $P_K = P_T$ , т. е.  $H_{K_{ад}} \cdot G_6 = H_{T_{ад}} \cdot G_T$ , то

$$\frac{L_K}{\eta_M} \cdot G_6 = H_{T_{ад}} \cdot G_T \cdot \eta_T.$$

Тогда:

$$\begin{aligned}
 H_{T_{ad}} &= \frac{G_b}{G_T} \cdot \frac{L_k}{\eta_m \cdot \eta_T} = \frac{G_b}{G_T} \cdot \frac{c_{p0} \cdot (t_k - T_0)}{\eta_m \cdot \eta_T} = \\
 &= \frac{G_b}{G_b + \frac{G_b}{\alpha \cdot l_0}} \cdot \frac{R \cdot \frac{k}{k-1} \cdot (t_k - T_0)}{\eta_m \cdot \eta_T} = \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{1}{1,8 \cdot 14,5}} \cdot \frac{1,0045}{0,95 \cdot 0,63} \cdot (0 - 20) = 80,82 \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right];
 \end{aligned}$$

Отсюда

$$T_T = \frac{80,71}{1,157 \cdot \left( 1 - \frac{1}{1,54^{0,25}} \right)} = 683\text{K}; \text{ или } t_T = 410^{\circ}\text{C}.$$

Задача 8.9.

Четырёхтактный дизель с газотурбинным наддувом работает на номинальном режиме. При этом ТК имеет следующие показатели работы.

Температура воздуха на выходе из компрессора  $t_k = 75^{\circ}\text{C}$ ;

давление перед турбиной  $p_T = 0,16$  МПа;

механический КПД компрессора  $\eta_{mk} = 97\%$ ;

полный КПД турбины  $\eta_T = 65\%$ ;

коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,7$ , а  $l_0 = 14,6$  кг/кг.

Определить температуру газов перед турбиной на этом режиме работы.

Давление и температура окружающей среды:  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 23^{\circ}\text{C}$  соответственно.

(Ответ:  $348^{\circ}\text{C}$ ).

Задача 8.10.

Четырёхтактный дизель с газотурбинным наддувом работает на номинальном режиме. При этом ТК имеет следующие показатели работы.

Температура воздуха на выходе из компрессора  $t_k = 79$  °C;  
давление перед турбиной  $p_T = 0,162$  МПа;

механический КПД компрессора  $\eta_{мк} = 92\%$ ;

полный КПД турбины  $\eta_T = 61\%$ ;

коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,65$ , а  $l_0 = 14,7$  кг/кг.

Определить температуру газов перед турбиной на этом режиме работы.

Давление и температура окружающей среды:  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 25$  °C соответственно.

(Ответ: 434 °C).

Задача 8.11.

Четырёхтактный дизель с газотурбинным наддувом работает на номинальном режиме. При этом ТК имеет следующие показатели работы.

Температура воздуха на выходе из компрессора  $t_k = 71$  °C;  
давление перед турбиной  $p_T = 0,155$  МПа;

механический КПД компрессора  $\eta_{мк} = 94\%$ ;

полный КПД турбины  $\eta_T = 67\%$ ;

коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,68$ , а  $l_0 = 14,45$  кг/кг.

Определить температуру газов перед турбиной на этом режиме работы.

Давление и температура окружающей среды:  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 15$  °C соответственно.

(Ответ: 442 °C).

Задача 8.12.

Четырёхтактный дизель с газотурбинным наддувом работает на номинальном режиме. При этом ТК имеет следующие показатели работы.

Температура воздуха на выходе из компрессора  $t_k = 85$  °С;  
давление перед турбиной  $p_T = 0,18$  МПа;

механический КПД компрессора  $\eta_{мк} = 94\%$ ;

полный КПД турбины  $\eta_T = 65\%$ ;

коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,6$ , а  $l_0 = 14,4$  кг/кг.

Определить температуру газов перед турбиной на этом режиме работы.

Давление и температура окружающей среды:  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 30$  °С соответственно.

(Ответ: 276 °С).

Задача 8.13.

Четырёхтактный дизель с числом цилиндров  $i=8$  работает в высокогорье ( $H=3000$  м над уровнем моря), развивая в этих условиях мощность  $P_{eн} = 163,4$  кВт при частоте вращения вала  $n = 2200$  мин<sup>-1</sup>. При этом его удельный эффективный расход топлива составляет  $g_{eн} = 380,8$  г/кВт·ч. Определено, что его индикаторный КПД из-за влияния высокогорья снизился на 30% по отношению к условиям на уровне моря, а его механический КПД в условиях высокогорья не изменился. На двигателе используется топливо, для которого  $H_u = 42470$  кДж/кг. Предположим, что на этот двигатель установили турбокомпрессор (ТК) для компенсации высокогорных потерь.

Определить, на сколько снизится удельный расход топлива дизелем с наддувом в тех же высокогорных условиях?

(Индексами «н» и «о» обозначим условия в высокогорье и на уровне моря соответственно).

Решение.

Благодаря компенсации высокогорных потерь установкой турбокомпрессора дизель с ТК в условиях высокогорья работает как двигатель без наддува в условиях на уровне моря. Следовательно снижение удельного расхода топлива определим как

$$\Delta g_e^{TK} = g_{e_n} - g_{e_o};$$

Определим эффективный КПД дизеля в условиях высокогорья

$$\eta_{e_n} = \eta_{i_n} \cdot \eta_{m_n} = 0,7 \cdot \eta_{i_o} \cdot \eta_{m_o} = 0,7 \cdot \eta_{e_o};$$

$$\eta_{e_n} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{H_u \cdot g_{e_n}} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{42470 \cdot 380,8} = 0,223;$$

$$\text{Тогда } \eta_{e_o} = \eta_{e_n} / 0,7 = 0,318;$$

Отсюда определим удельный расход топлива в нормальных условиях

$$g_{e_o} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{42470 \cdot 0,318} = 266,6 \text{ г/кВтч};$$

Тогда уменьшение удельного расхода топлива составит

$$\Delta g_e^{TK} = 380,8 - 266,6 = 114,2 \text{ г/кВтч}.$$

Задача 8.14.

Четырёхтактный дизель с числом цилиндров  $i=6$  работает в высокогорье ( $H=2000$  м над уровнем моря), развивая в этих условиях мощность  $P_{e_n}=62$  кВт при частоте вращения вала  $n=2300$  мин<sup>-1</sup>. При этом его удельный эффективный расход топлива составляет  $g_{e_n}=340$  г/кВт·ч. Определено, что его индикаторный КПД из-за влияния высокогорья снизился на 15% по отношению к условиям на уровне моря, а его механический КПД в условиях высокогорья не изменил-

=====  
ся. На двигателе используется топливо, для которого  $H_u=42550$  кДж/кг. Предположим, что на этот двигатель установили турбокомпрессор (ТК) для компенсации высокогорных потерь.

Определить, на сколько снизится удельный расход топлива дизелем с наддувом в тех же высокогорных условиях?

(Индексами «н» и «о» обозначим условия в высокогорье и на уровне моря соответственно).

(Ответ: 51 г/кВтч).

Задача 8.15.

Четырёхтактный дизель с числом цилиндров  $i=4$  работает в высокогорье ( $H=2500$  м над уровнем моря), развивая в этих условиях мощность  $P_{e_n}=84,4$  кВт при частоте вращения вала  $n=2150$  мин<sup>-1</sup>. При этом его удельный эффективный расход топлива составляет  $g_{e_n}=390,5$  г/кВт·ч. Определено, что его индикаторный КПД из – за влияния высокогорья снизился на 38% по отношению к условиям на уровне моря, а его механический КПД в условиях высокогорья не изменился. На двигателе используется топливо, для которого  $H_u=42450$  кДж/кг. Предположим, что на этот двигатель установили турбокомпрессор (ТК) для компенсации высокогорных потерь.

Определить, на сколько снизится удельный расход топлива дизелем с наддувом в тех же высокогорных условиях?

(Индексами «н» и «о» обозначим условия в высокогорье и на уровне моря соответственно).

(Ответ: 148,4 г/кВтч).

Задача 8.16.

Четырёхтактный дизель с числом цилиндров  $i=10$  работает в высокогорье ( $H=4000$  м над уровнем моря), развивая в

этих условиях мощность  $P_{e_n} = 272,2$  кВт при частоте вращения вала  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>. При этом его удельный эффективный расход топлива составляет  $g_{e_n} = 386,9$  г/кВт·ч. Определено, что его индикаторный КПД из – за влияния высокогорья снизился на 40% по отношению к условиям на уровне моря, а его механический КПД в условиях высокогорья не изменился. На двигателе используется топливо, для которого  $H_d = 42360$  кДж/кг. Предположим, что на этот двигатель установили турбокомпрессор (ТК) для компенсации высокогорных потерь.

Определить, на сколько снизится удельный расход топлива дизелем с наддувом в тех же высокогорных условиях?

(Индексами «н» и «о» обозначим условия в высокогорье и на уровне моря соответственно).

(Ответ: 154,8 г/кВтч).

Задача 8.17.

Четырёхтактный дизель с естественным всасыванием работает с коэффициентом остаточных газов  $\gamma_{r0} = 0,04$ . Применением нагнетателя двигатель форсирован наддувом и имеет  $p_k = 1,5$  бар и  $T_k = 360$  К. Одновременно произошло увеличение давления и температуры газов на выпуске (от  $p_{r0}$  и  $T_{r0}$  до  $p_{rn}$  и  $T_{rn}$ ) соответственно на 15% и 22%. Новый коэффициент остаточных газов ( $\gamma_{rn}$ ) стал равен 0,025. Определить процент изменения коэффициента наполнения двигателя после применения наддува, если  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 20$  °С.

Решение.

Для четырёхтактного двигателя имеем:

$$\gamma_r = \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_r}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_r} \cdot \frac{1}{\eta_v};$$

(предполагаем, что коэффициент продувки равен 1,0).

$$\text{Следовательно } \eta_v = \frac{1}{\gamma_r} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_r}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_r};$$

$$\text{Тогда } \frac{\eta_{v_n}}{\eta_{v_0}} = \frac{\gamma_{r_0}}{\gamma_{r_n}} \cdot \frac{p_{k_0}}{p_{k_n}} \cdot \frac{p_{r_n}}{p_{r_0}} \cdot \frac{T_{k_n}}{T_{k_0}} \cdot \frac{T_{r_0}}{T_{r_n}};$$

$$\text{Или } \frac{\eta_{v_n}}{\eta_{v_0}} = \frac{0,04}{0,025} \cdot \frac{1}{1,5} \cdot \frac{1,15 \cdot p_{r_0}}{p_{r_0}} \cdot \frac{360}{293} \cdot \frac{T_{r_0}}{1,22 \cdot T_{r_0}} = 1,2354.$$

$$\text{Или } \eta_{v_n} = 1,2354 \cdot \eta_{v_0};$$

Следовательно изменение коэффициента наполнения составило  $\Delta\eta_v = 23,54\%$ .

Задача 8.18.

Четырёхтактный дизель с естественным всасыванием работает с коэффициентом остаточных газов  $\gamma_{r_0}=0,05$ . Применением нагнетателя двигатель форсирован наддувом и имеет  $p_k=1,65$  бар и  $T_k=395$  К. Одновременно произошло увеличение давления и температуры газов на выпуске (от  $p_{r_0}$  и  $T_{r_0}$  до  $p_{r_n}$  и  $T_{r_n}$ ) соответственно на 16% и 26%. Новый коэффициент остаточных газов ( $\gamma_{r_n}$ ) стал равен 0,032. Определить процент изменения коэффициента наполнения двигателя после применения наддува, если  $p_0=1$  бар,  $t_0=20$  °С.

(Ответ: 11,1 %).

Задача 8.19.

Четырёхтактный дизель с естественным всасыванием работает с коэффициентом остаточных газов  $\gamma_{r_0}=0,08$ . Применением нагнетателя двигатель форсирован наддувом и имеет  $p_k=1,55$  бар и  $T_k=380$  К. Одновременно произошло увеличение давления и температуры газов на выпуске (от  $p_{r_0}$  и  $T_{r_0}$  до  $p_{r_n}$  и  $T_{r_n}$ ) соответственно на 14% и 24%. Новый коэффициент остаточных газов ( $\gamma_{r_n}$ ) стал равен 0,052. Определить процент



=====

изменения коэффициента наполнения двигателя после применения наддува, если  $p_0=1$  бар,  $t_0=10$  °С.

(Ответ: 11,3 %).

Задача 8.20.

Четырёхтактный дизель с естественным всасыванием работает с коэффициентом остаточных газов  $\gamma_{г0}=0,035$ . Применением нагнетателя двигатель форсирован наддувом и имеет  $p_k=1,95$  бар и  $T_k=445$  К. Одновременно произошло увеличение давления и температуры газов на выпуске (от  $p_{г0}$  и  $T_{г0}$  до  $p_{гн}$  и  $T_{гн}$ ) соответственно на 19% и 29%. Новый коэффициент остаточных газов ( $\gamma_{гн}$ ) стал равен 0,032. Определить процент изменения коэффициента наполнения двигателя после применения наддува, если  $p_0=1$  бар,  $t_0=5$  °С.

(Ответ: 1,9%).